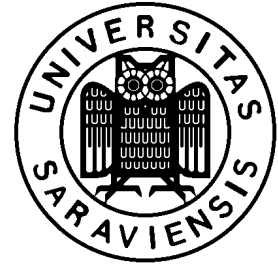


Aus der neurologischen Klinik

Direktor: Prof. Dr. K. Faßbender

Universitätsklinikum des Saarlandes, Homburg/Saar



**Analyse repetitiver Bewegungen bei Patienten mit M. Parkinson:
Untersuchungen zu Eigenrhythmus, Rhythmusadaptation und Einfluss exter-
ner Taktgeber**

Dissertation zur Erlangung des Grades eines Doktors der Medizin

der Medizinischen Fakultät

der UNIVERSITÄT DES SAARLANDES

2007

vorgelegt von: Lena Arnold

geboren am 08.11.1980 in Filderstadt

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	II
Abbildungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis.....	VI
Abkürzungsverzeichnis	VIII
1 Zusammenfassung.....	1
2 Abstract	3
3 Einleitung	5
3.1 Morbus Parkinson	5
3.2 Pathophysiologie	5
3.3 Symptome und Verlauf	6
3.4 Ausführung willkürlicher Bewegungen	8
3.4.1 Repetitive und sequentielle Bewegungen	9
3.4.2 Synchronisation von Bewegungen zu externen Taktgebern	10
3.5 Motorisches Lernen.....	11
3.6 Zusammenfassung.....	11
3.7 Fragestellung	14
4 Material und Methodik.....	15
4.1 Patienten und Probanden.....	15
4.1.1 Patienten mit Morbus Parkinson	15
4.1.2 Altersgematchte Kontrollgruppe	16
4.1.3 Junge Kontrollgruppe.....	17
4.2 Versuchsaufbau	18
4.3 Versuchsablauf.....	20
4.4 Geräte und Datenregistrierung	24
4.4.1 EMG	24
4.4.2 Potentiometer	25
4.4.3 Datenregistrierung.....	25
4.5 Auswertung	26
4.5.1 halbe Periodendauer	27
4.5.2 Adaptationsphase	28
4.5.3 Streubreite in der stationären Phase	31

4.5.4	Abweichung der durchschnittlichen halben Periodendauer	32
4.5.5	Standardabweichung der halben Periodendauer	34
4.5.6	Werte im Zielbereich.....	34
4.5.7	Durchschnittliche Amplitudenabweichung	34
4.6	Statistische Methoden	35
4.6.1	Univariate Varianzanalyse	35
4.6.2	Lineare Regression.....	36
4.7	Statistischen Auswertung	36
5	Ergebnisse	39
5.1	halbe Periodendauer	39
5.2	Adaptationsphase	41
5.2.1	Adaptationszeit [ms]	41
5.2.2	Adaptation nach Anzahl der Unterarmbewegungen	44
5.3	Streubreite in der stationären Phase	48
5.4	Abweichung der durchschnittlichen halben Periodendauer	51
5.5	Standardabweichung der halben Periodendauer	56
5.6	Werte im Zielbereich.....	58
5.7	Abweichung der Amplituden	62
5.7.1	Amplitudenabweichung bei Beugebewegung.....	62
5.7.2	Amplitudenabweichung bei Streckbewegung.....	64
5.8	Lineare Regressionsanalyse zur Untersuchung eines Lern- oder Ermüdungseffekts ...	66
5.8.1	Adaptationszeit [ms]	66
5.8.2	Streubreite	71
6	Diskussion	75
6.1	Methodische Diskussion	75
6.1.1	Fehlermöglichkeiten bei der Messung und Datenerfassung	75
6.1.2	Fehlermöglichkeiten bei der Auswertung	76
6.1.3	Aussagekraft der erhobenen Parameter.....	77
6.2	Diskussion der Ergebnisse	79
6.2.1	Adaptationsphase	79
6.2.2	Stationäre Phase	81
6.2.3	Lern- und Ermüdungseffekte im Verlauf der Untersuchung	85
7	Schlussfolgerung	87
8	Literatur	89

9	Dank	97
10	Lebenslauf	98
11	Anhang	100

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 4.1: Positionierung des Probanden.....	19
Abbildung 4.2: Lagerung des Armes auf dem Potentiometertisch	20
Abbildung 4.3: Verlauf der Frequenzen.....	22
Abbildung 4.4: Geräte und Datenregistrierung	24
Abbildung 4.5: EMG- und Potentiometersignale im zeitlichen Verlauf.....	26
Abbildung 4.6: Berechnung der <i>halben Periodendauer</i>	27
Abbildung 4.7: Frequenzadaptation und stationäre Phase bei akustischer Frequenzvorgabe.....	28
Abbildung 4.8: graphische Darstellung des Parameters <i>Streubreite</i>	32
Abbildung 4.9: graphische Darstellung des Parameters <i>Abweichung</i> der durchschnittlichen <i>halben Periodendauer</i>	33
Abbildung 4.10: Vorgehen bei der statistischen Auswertung.....	38
Abbildung 5.1: Mittelwerte und Standardabweichungen für <i>halbe Periodendauer [ms]</i>	39
Abbildung 5.2: Mittelwerte und Standardabweichungen für <i>Adaptationszeit [ms]</i>	41
Abbildung 5.3: Mittelwerte und Standardabweichungen für <i>Adaptation nach Anzahl der</i> <i>Unterarmbewegungen</i>	44
Abbildung 5.4: Mittelwerte und Standardabweichungen für <i>Streubreite [ms]</i>	49
Abbildung 5.5: Mittelwerte und Standardabweichung für <i>Abweichung</i> der durchschnittlichen <i>halben Periodendauer [%]</i>	52
Abbildung 5.6: Mittelwerte und Standardabweichungen für <i>Standardabweichung</i> der halben <i>Periodendauer [%]</i>	56
Abbildung 5.7: Mittelwerte und Standardabweichung für <i>Werte im Zielbereich [%]</i>	59
Abbildung 5.8: Mittelwerte und Standardabweichungen für <i>Amplitudenabweichung bei</i> <i>Beugebewegung [°]</i>	62
Abbildung 5.9: Mittelwerte und Standardabweichungen für <i>Amplitudenabweichung bei</i> <i>Streckbewegung [°]</i>	64
Abbildung 5.10: Regressionsanalyse für <i>Adaptationszeit [ms]</i> , Parkinsonpatienten.....	67
Abbildung 5.11: Regressionsanalyse für <i>Adaptationszeit [ms]</i> , Kontrollgruppe.....	68
Abbildung 5.12: Regressionsanalyse für <i>Adaptationszeit [ms]</i> , Kontrollgruppe jung	69
Abbildung 5.13: Regressionsanalyse für <i>Streubreite [ms]</i> , Parkinsonpatienten.....	71
Abbildung 5.14: Regressionsanalyse für <i>Streubreite [ms]</i> , Kontrollgruppe.....	72
Abbildung 5.15: Regressionsanalyse für <i>Streubreite [ms]</i> , Kontrollgruppe jung.....	73

Tabellenverzeichnis

Tabelle 4.1: Patienten mit M. Parkinson	16
Tabelle 4.2: Altersgematchte Kontrollgruppe	17
Tabelle 4.3: Junge Kontrollgruppe	18
Tabelle 5.1: Mittelwerte und Standardabweichungen für <i>halbe Periodendauer [ms]</i>	39
Tabelle 5.2: Post-Hoc-Test Gruppe für <i>halbe Periodendauer [ms]</i>	40
Tabelle 5.3: Mittelwerte und Standardabweichungen für <i>Adaptationszeit [ms]</i>	41
Tabelle 5.4: Post-Hoc-Test Sprung für <i>Adaptationszeit [ms]</i>	43
Tabelle 5.5: Mittelwerte und Standardabweichungen für <i>Adaptation nach Anzahl der Unterarmbewegungen</i>	45
Tabelle 5.6: Post-Hoc-Test Sprung für <i>Adaptation nach Anzahl der Unterarmbewegungen</i>	47
Tabelle 5.7: Post-Hoc-Test Gruppe für <i>Adaptation nach Anzahl der Unterarmbewegungen</i>	47
Tabelle 5.8: Mittelwerte und Standardabweichungen für <i>Streubreite [ms]</i>	49
Tabelle 5.9: Post-Hoc-Test Gruppe für <i>Streubreite [ms]</i>	50
Tabelle 5.10: Post-Hoc-Test Sprung für <i>Streubreite [ms]</i>	51
Tabelle 5.11: Mittelwerte und Standardabweichung für <i>Abweichung der durchschnittlichen halben Periodendauer [%]</i>	52
Tabelle 5.12: Post-Hoc-Test Sprung für <i>Abweichung der durchschnittlichen halben Periodendauer [%]</i>	54
Tabelle 5.13: <i>Abweichung > 5%</i> in den einzelnen Probandengruppen	54
Tabelle 5.14: Mittelwerte und Standardabweichungen für <i>Standardabweichung der halben Periodendauer [%]</i>	57
Tabelle 5.15: Post-Hoc-Test Gruppe für <i>Standardabweichung der halben Periodendauer [%]</i> ...	58
Tabelle 5.16: Mittelwerte und Standardabweichung für <i>Werte im Zielbereich [%]</i>	59
Tabelle 5.17: Post-Hoc-Test Gruppe für <i>Werte im Zielbereich [%]</i>	61
Tabelle 5.18: Post-Hoc-Test Sprung für <i>Werte im Zielbereich [%]</i>	61
Tabelle 5.19: Mittelwerte und Standardabweichungen für <i>Amplitudenabweichung bei Beugebewegung [°]</i>	63
Tabelle 5.20 : Mittelwerte und Standardabweichungen für <i>Amplitudenabweichung bei Streckbewegung [°]</i>	64
Tabelle 5.21: Post-Hoc-Test Gruppe für <i>Amplitudenabweichung bei Streckbewegung [°]</i>	65
Tabelle 5.22: lineare Regressionsanalyse für <i>Adaptationszeit [ms]</i>	70

Tabelle 5.23: lineare Regressionsanalyse für <i>Streubreite [ms]</i>	74
Tabelle 11.1: univariate Varianzanalyse für <i>halbe Periodendauer [ms]</i>	100
Tabelle 11.2: univariate Varianzanalyse für <i>Adaptationszeit [ms]</i>	100
Tabelle 11.3: univariate Varianzanalyse für <i>Adaptationszeit [ms]</i> getrennt nach Sprüngen	100
Tabelle 11.4: univariate Varianzanalyse für <i>Adaptation nach Anzahl der Unterarmbewegungen</i>	100
Tabelle 11.5: univariate Varianzanalyse für <i>Adaptation nach Anzahl der Unterarmbewegungen</i> getrennt nach Sprüngen	101
Tabelle 11.6: univariate Varianzanalyse für <i>Adaptation nach Anzahl der Unterarmbewegungen</i> getrennt nach Gruppen	101
Tabelle 11.7: univariate Varianzanalyse für <i>Streubreite [ms]</i>	101
Tabelle 11.8: univariate Varianzanalyse für <i>Abweichung der durchschnittlichen halben</i> <i>Periodendauer [%]</i>	101
Tabelle 11.9: univariate Varianzanalyse für <i>Standardabweichung der halben Periodendauer [%]</i>	102
Tabelle 11.10: univariate Varianzanalyse für <i>Werte im Zielbereich [%]</i>	102
Tabelle 11.11: univariate Varianzanalyse für <i>Amplitudenabweichung bei Beugebewegung [°]</i>	102
Tabelle 11.12: univariate Varianzanalyse für <i>Amplitudenabweichung bei Streckbewegung [°]</i>	102
Tabelle 11.13: <i>Abweichungen</i> der Probanden der Parkinsongruppe.....	103
Tabelle 11.14: <i>Abweichungen</i> der Probanden der altersgematchten Kontrollgruppe	103
Tabelle 11.15: <i>Abweichungen</i> der Probanden der jungen Kontrollgruppe	104

Abkürzungsverzeichnis

EMG Elektromyogramm

Hz Hertz

M. Musculus

M. Morbus

ms Millisekunde

V Volt

Z. n. Zustand nach

1 Zusammenfassung

Frühere Studien haben ergeben, dass Parkinsonpatienten Schwierigkeiten haben repetitive Bewegungen auszuführen, einen Takt zu generieren und zu internalisieren. Um diesen Sachverhalt genauer zu klären, sollten Parkinsonpatienten und Kontrollpersonen in der vorliegenden Arbeit repetitive Flexions-Extensionsbewegungen im Ellenbogengelenk durchführen.

Zunächst sollte ein frei gewählter mittlerer Takt generiert werden. Dann sollten die Unterarmbewegungen in randomisierter Reihenfolge an eine langsamere und eine schnellere Taktvorgabe angepasst werden. Diese Taktvorgaben waren hierbei um 30 % langsamer oder schneller als der selbst gewählte Rhythmus.

An der Untersuchung nahmen 50 Probanden teil: siebzehn Patienten mit einem idiopathischen Parkinsonsyndrom und ihre altersgematchten Kontrollen, sowie sechzehn gesunde Kontrollpersonen im Alter zwischen 21 und 31 Jahren. Es wurde untersucht wie regelmäßig der frei gewählte Takt generiert wurde und wie schnell und wie exakt die Untersuchungsteilnehmer ihre Bewegungen zu einem externen Taktgeber synchronisieren konnten. Des Weiteren wurden die sich wiederholenden Messungen auf einen Lern- beziehungsweise Ermüdungseffekt untersucht.

Die Parkinsonpatienten schlugen den frei gewählten Takt mit einer signifikant langsameren Frequenz als die beiden Kontrollgruppen. Da sich die darauf folgenden Taktvorgaben an dieser Frequenz orientieren, mussten die Kontrollpersonen während der gesamten Untersuchung schnellere Unterarmbewegungen durchführen als die Parkinsonpatienten.

Alle Probanden benötigten zur Adaptation an die langsame Taktvorgabe signifikant mehr Unterarmbewegungen als zur Adaptation an die schnelle Taktvorgabe. Darüber hinaus zeigten Parkinsonpatienten bei Taktvorgabe im Vergleich zu jungen Kontrollpersonen signifikant verlängerte Adaptationsphasen.

Nach vollzogener Adaptation zeigten die Parkinsonpatienten des Weiteren eine signifikant größere Ungenauigkeit und Unregelmäßigkeit beim Ausführen der repetitiven Unterarmbewegungen. Dies war sowohl bei den Messungen der Fall, bei denen der Takt des Metronoms synchronisiert werden sollte, als auch bei den Messungen, in denen der gewählte mittlere Takt reproduziert werden sollte. Das bedeutet, dass die Bewegungen der Parkinsonpatienten hinsichtlich

der Bewegungsdauer eine höhere Variabilität im Vergleich zu gesunden Kontrollpersonen aufwiesen.

Die Parkinsonpatienten generierten bei schneller Taktvorgabe eine im Durchschnitt um 5,2 % zu langsame Frequenz. Gegen die alleinige Ursache der Bradykinese spricht jedoch, dass die Patienten signifikant langsameren Frequenzen folgen mussten als die Kontrollpersonen. Des Weiteren zeigten sie auch bei langsamer Taktvorgabe häufiger ein zu langsames oder zu schnelles Taktschlagen als die Kontrollpersonen.

Alle Probanden wurden beim Generieren der mittleren Frequenz ohne Taktvorgabe von der vorangegangenen Rhythmusvorgabe beeinflusst. Sie schlugen den Takt nach einer schnellen Frequenzvorgabe signifikant schneller als nach einer langsamen Frequenzvorgabe.

Die Verlaufsanalyse der sich wiederholenden Messungen ergab einen Ermüdungseffekt in der Gruppe der Parkinsonpatienten bei den Messungen ohne Taktvorgabe. Das bedeutet, dass die Bewegungen der Parkinsonpatienten im Verlauf der Untersuchung immer ungenauer und unregelmäßiger wurden. In keiner der beiden Kontrollgruppen konnte solch ein Ermüdungseffekt für die frei gewählte Frequenz gefunden werden. Dies lässt darauf schließen, dass Parkinsonpatienten auf eine Taktvorgabe angewiesen sind um die Regelmäßigkeit ihrer Bewegungen auf einem stabilen Niveau zu halten.

Wie oben dargestellt, wiesen Parkinsonpatienten im Vergleich zu Kontrollpersonen verlängerte Adaptationsphasen auf, außerdem zeigten sie eine erhöhte Variabilität und Ungenauigkeit der Bewegungen, welche auch beim Generieren eines eigenständigen Taktes auftrat. Deshalb kann davon ausgegangen werden, dass Parkinsonpatienten generell Schwierigkeiten haben repetitive Bewegungen auszuführen und ihre Bewegungsmuster umzustellen. Bei der Durchführung der Bewegungen zur schnellen Taktvorgabe kann von einer Summation dieser Effekte mit der bekannten Bradydiadochokinese ausgegangen werden.

2 Abstract

Analysis of repetitive movements in patients with Parkinson's disease: A study of self-paced movements, adaptation and the influence of external pace

Earlier studies have revealed that patients with Parkinson's disease have difficulties to perform repetitive movements and to generate and internalise beat. In order to determine the circumstances more precisely, patients with Parkinson's disease and controls had to perform rhythmic flexion-extension-movements at the elbow joint.

At the start, a self-paced medium beat had to be generated. Then, in the course of the study, the forearm movements had to be synchronised with an auditory signal in randomised sequence. These auditory signals were determined according to the medium beat generated by the respective probands and they were slower or faster by thirty percent than the medium beat in these cases.

Fifty probands were included in this study: 17 patients with an idiopathic parkinson syndrome and their aged and gender matched controls as well as 16 younger healthy controls aged between 21 and 31 years. The objective of the study was to find out, how regularly the self-paced beat was generated as well as how fast and how precisely the parkinsonian patients were able to synchronize their movements to an external auditory signal. Furthermore, the individual measurements were examined regarding a learning or a fatigue effect respectively in the course of the study.

Compared to the two control groups, the patients with Parkinson's disease hit the self-paced medium beat with a significantly lower frequency. The auditory signals were determined according to the medium beat, so the probands of the control groups had to generate faster forearm movements through the whole examination.

All probands needed significantly more forearm movements to adjust their movements to the slow external signal as compared to the fast one. Yet, in this connection, the parkinsonian patients needed significantly more forearm movements to adapt to the particular beat as compared to the probands of the young control group.

When the adaptation to the particular frequency was completed, the patients with Parkinson's disease showed a significantly lower precision and lower regularity of the forearm movements. This was the case both at the measurements when the beat of the metronome had to be synchronized and at the measurements when the self-paced medium beat had to be reproduced. This means that their movements showed a higher variability with regard to the movement duration.

The parkinsonian patients hit the beat to the fast auditory signal to slow by 5.2 percent on average. This might be interpreted in the sense of bradykinesia, it should, however, be pointed out that the patients had to follow significant slower auditory signals. Furthermore, compared to the controls the patients with Parkinson's disease showed a decreased or increased frequency even if they had to synchronise their movements to the slow beat.

Furthermore, it turned out that all test persons were influenced by the preceding rhythm handicap when generating a medium frequency without an external signal. After a fast frequency handicap they hit the beat significantly faster than after a slow frequency handicap.

The analysis of the running order established a significant fatigue effect during the measurements without an external signal in the group of the parkinsonian patients. This means that the movements of the patients became more and more imprecise and irregular. Such a symptom of fatigue for the self-paced medium beat could not be established in the case of the two control groups. So it could be suggested that parkinsonian patients depend on an external pace to keep the regularity of their movements on a steady level.

Compared to the controls the patients with Parkinson's disease showed prolonged adaptation periods and a significant increased inaccuracy, variability and irregularity of the forearm movements, which also occurred when generating an independently self-paced beat. These findings suggest that patients with Parkinson's disease are impaired in generating repetitive movements and to switch their movement patterns. When carrying out rapid alternating forearm movements this deficiency add to the deficiency of motor skills in the sense of bradydiadochokinesia.

3 Einleitung

3.1 Morbus Parkinson

Das idiopathische Parkinsonsyndrom, oder der Morbus Parkinson, wurde erstmals von James Parkinson beschrieben. Er gab der Krankheit 1817 den Namen „shaking palsy“ (Schüttellähmung). Die Prävalenz des Parkinsonsyndroms nimmt mit dem Lebensalter zu. Es ist die häufigste neurologische Erkrankung des fortgeschrittenen Lebensalters, wobei der Erkrankungsbeginn meist zwischen dem 40. und 60. Lebensjahr liegt. Klinische Symptome finden sich bei ungefähr 1,4 % der 55jährigen und 3,4 % der 75jährigen (Poeck 2001).

Die meisten der Patienten mit einem Parkinsonsyndrom leiden an einem idiopathischen Parkinsonsyndrom. Ähnliche Symptome treten aber auch bei anderen Parkinsonsyndromen auf, die zum Beispiel postenzephalitisch, medikamentös-toxisch oder posthypoxisch entstehen können. Weitere Differentialdiagnosen stellen die hepatolentikuläre Degeneration, der M. Wilson, und die multisystemdegenerativen Erkrankungen dar. Man schätzt, dass 20% der Patienten mit einem Parkinsonsyndrom schließlich den multisystemdegenerativen Erkrankungen zugeordnet werden (Benecke 1999).

Die Ätiologie des Parkinsonsyndroms ist bis heute noch weitgehend ungeklärt. Wahrscheinlich sind genetische Faktoren daran beteiligt, dass es im mittleren bis höheren Lebensalter zur Degeneration der Neurone in der Substantia nigra kommt.

3.2 Pathophysiologie

Der Morbus Parkinson ist eine Erkrankung, die durch die Degeneration dopaminerger Zellen in der Substantia nigra, Pars compacta, zustande kommt. Dies führt zu einem Dopaminmangel an den Rezeptoren des Corpus striatum und so zu einer Überaktivierung der Neurone des Globus pallidus internus. Diese pathologische Zunahme der Aktivität des Globus pallidus internus führt wiederum zu einer überschießenden Hemmung des ventrolateralen Thalamus. Des weiteren kommt es zu einer Hemmung der Neurone des Globus pallidus externus, was über den Nucleus

subthalamicus und die Substantia nigra, Pars reticulata, wiederum zu einer Hemmung des Thalamus führt (Silbernagl 1998).

Der Thalamus sendet normalerweise exzitatorische Signale an den motorischen, den prämotorischen und den supplementär motorischen Kortex, welche dazu führen, dass gewünschte Bewegungen erleichtert und ungewollte Bewegungen unterdrückt werden (Marsden 1994, Wichmann 2003). Der supplementär motorische Kortex bereitet komplexe Bewegungsabläufe vor und ist so maßgeblich an der Durchführung sequentieller Bewegungen beteiligt. Der Dopaminmangel in der Substantia nigra, im Rahmen eines Morbus Parkinson, führt zu einer Verminderung der Aktivität des supplementär motorischen Kortex und könnte somit eine Ursache dafür sein, warum Parkinsonpatienten Schwierigkeiten haben sequentielle Bewegungen auszuführen und verschiedene Bewegungen miteinander zu verknüpfen (Klinke 1996). Zudem haben Parkinsonpatienten Schwierigkeiten bei der Ausführung von repetitiven und sequentiellen Bewegungen (siehe *Kapitel 3.4.1*).

3.3 Symptome und Verlauf

Goldstandard der Diagnose eines Parkinsonsyndroms ist bis heute die klinische Untersuchung. Die ersten klinischen Symptome, im Sinne einer motorischen Beeinträchtigung, treten allerdings erst auf, wenn mehr als 60 % der Neurone der Substantia nigra ausgefallen sind (Bernheimer 1973).

Frühsymptome eines Parkinsonsyndroms sind sehr unspezifisch und können als Schmerzen im Bereich der Extremitäten oder depressive Verstimmung in Erscheinung treten (Poeck 2001). Da eine wirksame neuroprotektive Therapie idealer Weise in der präklinischen Phase ansetzen sollte, ist der Bedarf an diagnostischen Mitteln groß, die eine Erkennung der Krankheit in dieser Phase erlauben. Hierzu könnte in Zukunft eine „Testbatterie“ aus transkranieller Sonografie, dem Nachweis verschiedener genetischer Mutationen und nichtmotorischer Symptome, wie Farbsinnes- oder Riechstörungen, etabliert werden (Becker 2003).

Die später auftretenden motorischen Symptome zeigen eine langsame Progression. Es kann im weiteren Verlauf zur bekannten Symptomtrias kommen, die aus den Kardinalsymptomen Akinese, Rigor und Ruhetremor besteht. Es finden sich außerdem Symptome wie Hypokinese

und Bradykinese, sowie eine Haltungsinstabilität durch Verlust der posturalen Reflexe (Marsden 1994, Bergmann 2002, Camicioli 2002).

Die motorischen Bewegungseinschränkungen werden mit verschiedenen Begriffen beschrieben, deshalb werden diese hier kurz erläutert. Der Begriff Bradykinese bedeutet, dass willkürliche Bewegungen nur langsam durchgeführt werden können. Akinese hingegen beinhaltet den Mangel an spontanen Bewegungen, wie zum Beispiel das verminderte Mitschwingen der Arme oder die Hypomimie, sowie die Hemmung des Bewegungsstarts. Der Begriff Hypokinese besagt, dass eine Verminderung der Bewegungsamplitude vorliegt, was sich zum Beispiel an der kleinen Schrift der Parkinsonpatienten, der so genannten Mikrographie, zeigt (Berardelli 2001).

Die am häufigsten zu findenden motorischen Defizite sind nach einer Untersuchung von Nieuwboer (1998) eine verminderte axiale Beweglichkeit und ein vermindertes Mitschwingen der Arme. Van Hilten (1998) fand hypokinetische Symptome nur bei schwerer betroffenen Patienten, wohingegen sich bradykinetische Symptome, im Sinne einer verlängerten Reaktionszeit, bei allen untersuchten Parkinsonpatienten fanden. Hierbei nahm die Intensität der Symptome proportional zum Krankheitsstadium zu.

Der auftretende Ruhetremor ist ein grobschlägiger Antagonistentremor, der meist asymmetrisch beginnt und eine Frequenz von 4-6 Hz aufweist. Er wird typischer Weise affektiv verstärkt (Masuhr 1992). Unter Rigor versteht man eine Erhöhung des Muskeltonus, die im Gegensatz zur Spastik über den gesamten Bewegungsablauf bestehen bleibt. Ein weiteres typisches Symptom ist die Bradydiadochokinese, das heißt Parkinsonpatienten haben Schwierigkeiten repetitive alternierende Bewegungsabläufe auszuführen. Es zeigt sich hierbei eine Verlangsamung der alternierenden Bewegungen. Außerdem treten nichtmotorische Symptome auf. Sie zeigen sich in vegetativen Begleitsymptomen, wie zum Beispiel Seborrhoe, Obstipation und Hypotonie, oder einer Beeinträchtigung des Denkvermögens, der Bradyphrenie.

3.4 Ausführung willkürlicher Bewegungen

Nach wie vor ist die Einschränkung der Bewegungsfähigkeit ein Hauptmerkmal des Parkinsonsyndroms. Es gibt zahlreiche Studien, die sich mit der Art der Bewegungseinschränkung, ihren möglichen Ursachen und Therapiemöglichkeiten beschäftigen.

Die beiden Kardinalsymptome Akinese und Bradykinese können beide zu einer verlangsamten Ausführung von Willkürbewegungen führen. Die Akinese stellt hierbei den verzögerten Beginn der Willkürbewegungen dar und führt so zu einer Verlängerung der Reaktionszeit, wobei die Reaktionszeit als Zeit zwischen Stimulus und Beginn der Bewegung definiert ist. Bradykinese bedeutet eine Verlangsamung in der Bewegungsdurchführung, das heißt die Zeit zwischen Initiierung und Komplettierung der Bewegung ist verlängert (Hallett 2003). Die Ursache der Bradykinese kann einerseits in der Langsamkeit der kortikalen oder subkortikalen Verarbeitung begründet liegen, andererseits kann sie auch durch eine Verlangsamung der Bewegungsausführung selbst zustande kommen (Berardelli 2001).

In verschiedenen Studien wurden die Reaktionszeiten von Parkinsonpatienten im Vergleich zu gesunden Kontrollen untersucht. Hierzu sollte der Proband auf ein Signal hin eine, im Voraus bekannte, motorische Reaktion ausführen. Diese Reaktionszeit war als Ausdruck der Akinese bei Parkinsonpatienten signifikant verlängert (Bloxham 1987, Sheridan 1987, Jahanshahi 1992, Kutucu 1999, Nakashima 1993).

Parkinsonpatienten können Bewegungen nicht so schnell ausführen wie gesunde Kontrollpersonen. Dies belegen mehrere Studien, in denen die Patienten signifikant langsamere Frequenzen als gesunde Kontrollpersonen generierten, wenn sie die Bewegungen so schnell wie möglich durchführen sollten (Berardelli 1996, Yahalom 2004, Benecke 1986, 87). Da sich zur Untersuchung der Bradykinese speziell repetitive Bewegungen eignen, hierauf wird in *Kapitel 3.4.1.* genauer eingegangen.

Des Weiteren wiesen Parkinsonpatienten bei der Bewegungsausführung eine größere Variabilität als ihre Kontrollpersonen auf. Dies war vor allem dann zu beobachten, wenn sie einen Bewegungsablauf so schnell wie möglich durchführen sollten (Sanes 1985, Sheridan 1990, Rand 2000). Sheridan (1990) und Rand (2000) stellten die Hypothese auf, dass die langsame Durchführung der Bewegungen, die Bradykinese, dazu dient, die Variabilität der Bewegungen auf ein normales Niveau zu senken.

3.4.1 Repetitive und sequentielle Bewegungen

Man misst heute den Basalganglien die Schlüsselrolle in der Initiierung und Ausführung von Bewegungen zu. Diese Theorie entsprang der Beobachtung, dass Parkinsonpatienten Schwierigkeiten haben repetitive oder sequentielle Bewegungen auszuführen (Agostino 1992, 94, 98, Byblow 2002, Berardelli 1986). Die Defizite in der Ausführung rhythmischer, repetitiver Bewegungen zeigten sich in Form von Hypo- und Bradykinese bei der Durchführung von wechselnden Pronations-Supinationsbewegungen im Handgelenk (Byblow 2002). Wenn die Bewegungen so schnell wie möglich durchgeführt werden sollten, generierten die Parkinsonpatienten signifikant langsamere Frequenzen als Kontrollpersonen (Yahalom 2004, Gordon 1998).

In einer Untersuchung von Yahalom (2004) konnte gezeigt werden, dass Parkinsonpatienten darüber hinaus Schwierigkeiten haben Bewegungen in einem selbst gewählten Rhythmus durchzuführen. Sie schlugen einen selbst gewählten, angenehmen Takt signifikant langsamer als gesunde Kontrollpersonen. Darüber hinaus wiesen die Bewegungen eine signifikant höhere Variabilität auf, das heißt sie wurden unregelmäßiger ausgeführt als die Bewegungen der Kontrollpersonen.

Verschiedene Studien haben gezeigt, dass die Durchführung repetitiver Bewegungen eine Abhängigkeit vom Lebensalter aufweist (Kauranen 1996, Nagasaki 1988, Nutt 2000). Nutt (2000) fand hierbei eine negative Korrelation zwischen Lebensalter und der maximalen Geschwindigkeit des Taktschlagens. In der Untersuchung von Kauranen (1996) zeigte sich eine signifikante Abnahme der Maximalgeschwindigkeit des Taktschlagens sowie eine Zunahme der Reaktionszeit bei Probanden die älter als 50 Jahre waren.

Bei der Ausführung sequentieller Bewegungen, die zum Beispiel erforderlich sind, um geometrische Figuren zu zeichnen, benötigten Parkinsonpatienten insgesamt gesehen mehr Zeit für die Durchführung der Aufgabe als Kontrollpersonen. Dies kam durch längere Pausen zwischen den einzelnen Aufgabenteilen zustande, das heißt, die Parkinsonpatienten benötigten mehr Zeit, um sich von einer Bewegung auf die nächste umzustellen (Agostino 1992, Berardelli 1986, Almeida 2003, Benecke 1987). Zu einem ähnlichen Ergebnis kam die Untersuchung von Byblow (2002), in der sich zeigte, dass Parkinsonpatienten signifikant länger benötigen, alternierende Unterarmbewegungen von beidseitig identischem Bewegungsablauf auf einen gegenläufigen Bewegungsablauf umzustellen.

Wie oben dargestellt haben Parkinsonpatienten Schwierigkeiten repetitive Bewegungen auszuführen. Da in der vorliegenden Arbeit die Anpassung der Bewegungen an einen vorgegebenen Takt untersucht werden soll, wird im folgenden Abschnitt die Fähigkeit von Parkinsonpatienten ihre repetitiven Bewegungen zu einem externen Taktgeber zu synchronisieren genauer beleuchtet.

3.4.2 Synchronisation von Bewegungen zu externen Taktgebern

Zahlreiche Studien lassen vermuten, dass Parkinsonpatienten ihre Bewegungen nicht akkurat zu externen Taktgebern synchronisieren können (Nakamura 1978, Nagasaki 1978, Freeman 1993, Pastor 1992, Logigian 1991).

Hierfür lassen sich unterschiedliche Ursachen finden. In den Untersuchungen von Nagasaki (1978) und Nakamura (1978) zeigten Patienten mit einem M. Parkinson im „finger tapping“ Test ein als „hastening“ bekanntes Phänomen. Einen Takt, der schneller als 2,5 Hz war, schlugen die Patienten mit einer Frequenz von 5-6 Hz, ohne dass dieses Phänomen eine Abhängigkeit von der vom externen Taktgeber dargebotenen Frequenz zeigte. In den Studien von Konczak (1997) und Yahalom (2004) trat das „hastening phenomenon“ hingegen nur bei höheren Frequenzen des Taktschlagens auf. Nagasaki et al. (1988) beschrieben eine Zunahme, dieses für den M. Parkinson typischen Phänomens, mit dem Lebensalter bei gesunden Personen und deuteten dies als eine striato-nigrale Dysfunktion in höherem Lebensalter.

In einem Experiment von Freeman (1993) sollten die Probanden ebenfalls einen Takt synchron zu einem Taktgeber schlagen. Die Parkinsonpatienten tendierten hierbei dazu, Frequenzen unter 3 Hz zu schnell zu schlagen („hastening“) und beim Darbieten von höheren Frequenzen von ungefähr 5 Hz den Takt zu langsam zu schlagen. Außerdem zeigten sie generell eine höhere Variabilität ihres Taktschlagens, das heißt sie waren weniger akkurat in der Ausführung der repetitiven Bewegungen. Weitere Untersuchungen zeigten ebenfalls eine höhere Variabilität der Bewegungsdauer, wenn sich die Patienten an einen vorgegebenen Takt anpassen sollten (van den Berg 2000, Konczak 1997, Yahalom 2004, Pastor 1992). Hier zeigte sich keine Abhängigkeit von der generierten Frequenz. Konczak (1997) fand außerdem eine signifikant verminderte Bewegungsamplitude der Parkinsonpatienten bei der Durchführung repetitiver Bewegungen.

Die Studienlage hinsichtlich der Verbesserung repetitiver Bewegungen unter externer Taktvorgabe ist uneinheitlich. Während Freeman (1993) eine Abnahme der Variabilität der Bewegungen von Parkinsonpatienten unter externer Taktgebung aufzeigen konnte, wurden die Bewegungen in der Untersuchung von Almeida (2002) unter Taktvorgabe nicht akkurater. In der Studie von Freeman (1993) verbesserte sich die Ausführung der repetitiven Bewegungen zwar unter externer Taktgebung, die Parkinsonpatienten zeigten aber sowohl mit als auch ohne Taktvorgabe signifikant inakkurater, also unregelmäßigere Bewegungen als gesunde Kontrollpersonen. Deshalb wurde zusätzlich zur motorischen Beeinträchtigung der Patienten eine Störung der internen Rhythmusbildung vermutet.

3.5 Motorisches Lernen

Die Fähigkeit durch Übung motorische Aufgaben zu verbessern, wird bezüglich Patienten mit einem M. Parkinson in der Literatur uneinheitlich bewertet. Einfache Zielbewegungen wurden durch Übung schneller initiiert und durchgeführt (Platz 1998, Behrmann 2000). In den Untersuchungen von Swinnen (2000) und Agostino (1996) zeigte sich eine Verbesserung der sequentiellen Bewegungen durch Training, die Bewegungen der Parkinsonpatienten waren hierbei aber nicht so exakt wie die der Kontrollpersonen. Bei der Durchführung von repetitiven Bewegungen konnte eine vorübergehende Verbesserung der Maximalgeschwindigkeit des Taktschlagens bei Parkinsonpatienten gefunden werden; dieser Lerneffekt war bei Abschluss der Untersuchung, nach 26 Stunden, allerdings nicht mehr nachzuweisen (Nutt 2000). In den Untersuchungen von Haarrington (1990) und Krebs (2001) zeigten Parkinsonpatienten, im Gegensatz zu Kontrollpersonen, keine Verbesserung komplexer motorischer Bewegungsabläufe durch Training.

3.6 Zusammenfassung

Zusammenfassend kann man feststellen, dass Parkinsonpatienten bei der Durchführung von Willkürbewegungen motorische Beeinträchtigungen in Form von Akinese und Bradykinese aufwiesen. Auch bei der Durchführung komplexer motorischer Aufgaben, wie sequentielle oder repetitive Bewegungen, zeigten Patienten mit M. Parkinson Defizite im Vergleich zu gesunden Kontrollpersonen. Sie wiesen hierbei eine Bradydiadochokinese und Hypokinese auf. Des Weiteren hatten sie Schwierigkeiten ihr Bewegungsmuster umzustellen.

Einen frei gewählten Takt schlugen Parkinsonpatienten in mehreren Studien signifikant langsamer und mit einer höheren Variabilität als Kontrollpersonen. Bei der Synchronisation repetitiver Bewegungen zu einem externen Taktgeber zeigten Parkinsonpatienten signifikant häufiger ein zu schnelles Taktschlagen der vorgegebenen Frequenz („hastening“). Außerdem führten sie die Bewegungen mit einer erhöhten Variabilität aus, das heißt sie schlugen den Takt inakkurater als die Kontrollpersonen. Die Verbesserung der Variabilität der Bewegungen unter externer Taktvorgabe wurde in der Literatur uneinheitlich bewertet.

Aus den Ergebnissen lässt sich schließen, dass Parkinsonpatienten Schwierigkeiten haben rhythmische Bewegungen zu initiieren und aufrechtzuerhalten. Sie scheinen außerdem unfähig zu sein, diese akkurat mit externen Taktgebern zu synchronisieren. Diese Ergebnisse, sowie die Schwierigkeiten ein Bewegungsmuster auf ein anderes umzustellen, lassen zusätzlich zur motorischen Beeinträchtigung ein Defizit in der internen Rhythmusbildung vermuten. Ein Defizit in der internen Rhythmusbildung zeigt sich auch in der verminderten Internalisierung eines Taktes. In der Untersuchung von Freeman (1993) sollten die Parkinsonpatienten die zuvor synchron zum externen Taktgeber ausgeführten Bewegungen beibehalten. Ohne Taktvorgabe kam es in der Parkinsongruppe zu einer Zunahme der Frequenz und der Unregelmäßigkeit der Bewegungen.

Parkinsonpatienten zeigten in mehreren Studien Schwierigkeiten einen selbst gewählten Takt zu generieren. Ein Defizit in der internen Rhythmusbildung müsste sich darüber hinaus, auch in der verminderten Fähigkeit diesen Takt zu reproduzieren, zeigen. Deshalb soll in der vorliegenden Arbeit die bislang nicht untersuchte Reproduzierbarkeit sowie die Beeinflussung dieses Taktes durch zuvor generierte Bewegungen untersucht werden.

Da in der Literatur die Fähigkeit des motorischen Lernens von Parkinsonpatienten sowie die Verbesserung der Variabilität der Bewegungen unter externer Taktvorgabe uneinheitlich bewertet wurden, sollen diese Punkte in der vorliegenden Arbeit genauer beleuchtet werden.

Die in *Kapitel 3.4.2* zitierten Studien weisen bei der Interpretation der Ergebnisse folgende Schwierigkeiten auf: Die Variabilität der Bewegungen wird als Durchschnittswert über einen festgelegten Untersuchungszeitraum erhoben. Es lässt sich anhand dieser Daten also nicht verifizieren, ob die erhöhte Variabilität in einer verzögerten Anpassung oder der Unregelmäßigkeit der Bewegungen selbst begründet liegt. Wie in *Kapitel 3.4.1* dargestellt, gibt es Hinweise darauf, dass Parkinsonpatienten Schwierigkeiten haben Bewegungen umzustellen. Um diese Sachverhal-

te genauer zu untersuchen soll in der vorliegenden Arbeit eine Unterscheidung zwischen der Dauer der Taktanpassung und der anschließenden Befolgung der Taktvorgabe getroffen werden. Des Weiteren gründen die vorgestellten Studien auf Frequenzvorgaben, welche für Parkinsonpatienten und Kontrollpersonen identisch waren. So wird die Variabilität der Bewegungen vom bekannten Phänomen der Bradykinese überlagert. Es lässt sich also durch eine Untersuchung nicht erklären, ob die Variabilität durch die motorische Beeinträchtigung der Parkinsonpatienten oder durch ein Defizit in der internen Rhythmusbildung verursacht wird. Deshalb richten sich in der vorliegenden Arbeit die Frequenzen, die mit dem Metronom dargeboten werden, nach dem frei gewählten angenehmen Takt des jeweiligen Probanden. Hierdurch soll die motorische Beeinträchtigung der Parkinsonpatienten relativiert werden.

3.7 Fragestellung

In der vorliegenden Arbeit sollen, wie oben ausgeführt, die Defizite von Parkinsonpatienten in der Ausführung willkürlicher Bewegungen genauer untersucht werden. Hierzu sollen die Untersuchungsteilnehmer regelmäßige repetitive Unterarmbewegungen durchführen und diese an verschiedene Taktsignale anpassen. Dabei sollen folgende Fragen beantwortet werden:

- Welchen Takt wählen Parkinsonpatienten und Kontrollpersonen beim Generieren eines frei wählbaren Taktes?
- Wie genau und regelmäßig können die Probanden den frei gewählten Takt im Verlauf der Messung reproduzieren? Wie schnell können sich die Untersuchungsteilnehmer auf diesen Takt einstellen?
- Wird die Reproduktion des selbst gewählten Taktes von der Geschwindigkeit der direkt vorher ausgeführten Unterarmbewegungen beeinflusst?
- Wie schnell können Parkinsonpatienten und Kontrollpersonen ihre Bewegungen an einen vorgegebenen Takt anpassen?
- Wie exakt und regelmäßig können die Probanden ihre Unterarmbewegungen zu diesem Taktgeber synchronisieren, wenn sie die Geschwindigkeit einmal erreicht haben?
- Ändert sich die Dauer der Frequenzadaptation oder die Genauigkeit des Taktschlagens im Verlauf der gesamten Untersuchung? Gibt es also einen Lern- oder Ermüdungseffekt?
- Gibt es bei der Durchführung repetitiver Bewegungen Unterschiede zwischen jungen und älteren gesunden Probanden?

4 Material und Methodik

4.1 Patienten und Probanden

Die untersuchten Teilnehmer wurden in drei Gruppen eingeteilt, eine Gruppe mit Parkinsonpatienten (*Abschnitt 4.1.1*), eine zu den Patienten altersgematchte Kontrollgruppe (*Abschnitt 4.1.2*) und eine junge Kontrollgruppe (*Abschnitt 4.1.3*). Bezüglich des Alters zeigten sowohl die Gruppe der Patienten mit M. Parkinson als auch die altersgematchte Kontrollgruppe eine Normalverteilung. Zwischen den beiden Gruppen bestand kein signifikanter Altersunterschied ($p = 0,776$). Die junge Kontrollgruppe wurde ausgewählt, um einen möglichen Einfluss des Lebensalters auf das Untersuchungsergebnis zu erfassen.

4.1.1 Patienten mit Morbus Parkinson

Das Patientenkollektiv umfasste siebzehn Patienten mit einem idiopathischen Parkinsonsyndrom vom akinetisch-rigiden Typ. Die Patienten wurden zum Zeitpunkt der Untersuchung entweder stationär in der neurologischen Universitätsklinik Homburg betreut, oder sie waren in der angegliederten Ambulanz der Universitätsklinik in Behandlung. Es handelte sich um acht Männer und neun Frauen im Alter von 38 bis 84 Jahren. Sie befanden sich zum Zeitpunkt der Untersuchung im Krankheitsstadium 1 beziehungsweise 2 nach Hoehn und Yahr (1998). Die einzelnen Patientendaten sind der *Tabelle 4.1* zu entnehmen.

Tabelle 4.1: Patienten mit M. Parkinson

Initialien	Geschlecht	Alter	Stadium nach Hoehn und Yahr	betroffene Seite
A.D.	m	51	1,5	re
A.L.	w	45	2	li
G.S.	m	68	1,5	re
G.S.	m	67	2	re
H.H.	m	67	2	re
H.K.	w	47	2	re
H.M.	w	57	1	re
H.S.	w	61	1,5	li
J.K.	m	38	1,5	re
K.F.	m	84	1,5	re
M.B.	w	65	1,5	re
M.F.	w	47	2	re
M.K.	w	60	2	li
M.K.	w	49	1,5	re
M.M.	w	46	2	re
M.N.	m	53	1,5	re
R.N.	m	60	1	re
Mittelwert		56,8		
Standardabweichung		11,4		

4.1.2 Altersgematchte Kontrollgruppe

Die Kontrollgruppe bestand ebenfalls aus siebzehn Probanden, es handelte sich hierbei um acht Männer und neun Frauen im Alter von 36 bis 80 Jahren. Es wurden ausschließlich Probanden ohne sensorische und motorische Defizite im Bereich der Arme eingeschlossen. Zu diesem Zweck nahmen sowohl Probanden ohne aktuelle oder frühere neurologische Erkrankung ($n = 10$), als auch Patienten der neurologischen Universitätsklinik Homburg, welche zum Beispiel an einer peripheren Fazialisparese ($n = 3$) oder einem lumbo-sakralen Bandscheibenvorfall ($n = 2$) erkrankt waren, an der Studie teil. Keiner der Probanden nahm Medikamente ein, welche die Motorik beeinträchtigen könnten, wie zum Beispiel Neuroleptika oder Antiepileptika. Keiner der

Probanden wies eine motorische Beeinträchtigung auf, die ihn bei der Durchführung der Untersuchung eingeschränkt hätte. Die Daten der Probanden, mit der unter Umständen bestehenden Diagnose, gibt die *Tabelle 4.2* wieder.

Tabelle 4.2: Altersgematchte Kontrollgruppe

Initialien	Geschlecht	Alter	Diagnose
A.H.	m	48	Kauda-equina-Syndrom
B.E.	w	52	keine neurologische Erkrankung
E.M.	w	80	keine neurologische Erkrankung
E.T.	w	65	Z. n. peripherer Vestibulopathie
G.H.	w	55	keine neurologische Erkrankung
G.N.	w	65	periphere Facialisparese
H.H.	m	56	keine neurologische Erkrankung
H.H.	m	40	periphere Facialisparese
J.A.	m	55	keine neurologische Erkrankung
J.S.	m	36	keine neurologische Erkrankung
M.U.	m	53	periphere Facialisparese
N.H.-K.	w	49	keine neurologische Erkrankung
S. A.	w	41	keine neurologische Erkrankung
S.M.	m	36	keine neurologische Erkrankung
T.B.	w	82	thorakaler Tumor
U.A.-K.	w	50	keine neurologische Erkrankung
W.Z.	m	80	lumbo-sakraler Bandscheibenvorfall
Mittelwert		55,5	
Standardabweichung		14,2	

4.1.3 Junge Kontrollgruppe

Diese Probandengruppe bestand aus sechzehn gesunden Personen im Alter zwischen 21 und 31 Jahren, im Mittel $25,6 \pm 2,5$ Jahre. Keiner der Probanden hat oder hatte eine neurologische Erkrankung oder war in irgendeiner Form motorisch beeinträchtigt. Alter und Geschlecht der Probanden gibt die *Tabelle 4.3* wieder.

Tabelle 4.3: Junge Kontrollgruppe

Initialen	Geschlecht	Alter
A.W.	w	24
B.M.	w	26
C.B.	w	25
F.S.	m	24
G.S.	m	30
H.B.	m	27
I.E.	w	23
J.A.	m	21
J.J.	m	26
M.B.	w	29
N.B.	m	25
S.B.	w	24
S.H.	m	25
S.S.	w	25
T.G.	w	31
V.H.	w	24

4.2 Versuchsaufbau

Während der Untersuchung saß der Proband aufrecht auf einem Stuhl, dieser war in der Sitzhöhe verstellbar, so dass eine ideale Sitzposition für jede Körpergröße eingenommen werden konnte. Zu seiner Rechten befand sich das Potentiometer, mit dem die Untersuchung durchgeführt wurde. Der Versuchsaufbau ist in der *Abbildung 4.1* als Aufsicht skizziert.

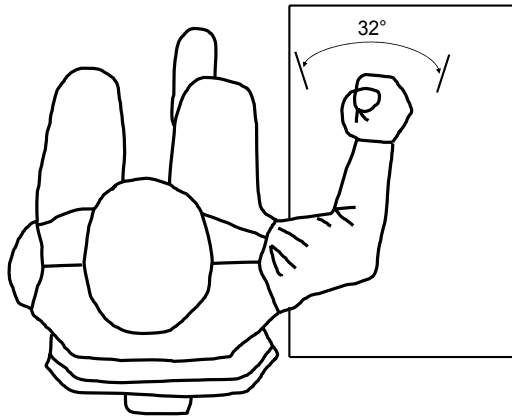


Abbildung 4.1: Positionierung des Probanden

Der im Schultergelenk rechtwinklig abduzierte rechte Arm des Probanden lagerte auf der Schienenkonstruktion des Potentiometers. Hierbei befand sich der Oberarm auf einer fixen Schiene. Der Unterarm war auf einer in Horizontalebene bewegbaren Schiene gelagert, welche durch ein Drehgelenk mit der fixen Oberarmschiene verbunden war. Die Unterarmschiene war ebenfalls in ihrer Länge verstellbar und konnte so an unterschiedliche Unterarmlängen angepasst werden. Am Ende der Schiene war ein senkrechter Metallstab montiert, den der Proband mit seiner Hand umfasste. Die Lagerung des Armes auf dem Potentiometertisch ist in *Abbildung 4.2* dargestellt. Wie in *Kapitel 4.4.1* genauer erläutert, befanden sich auf dem Oberarm die Elektroden zum Ableiten der EMG - Signale. Die Kabel waren hierbei so angebracht, dass sie den Bewegungsablauf nicht behinderten. Sie wurden zusätzlich an einer festgelegten Stelle fixiert, so sollten Störsignale, die durch Bewegen der Kabel entstehen können, minimiert werden.

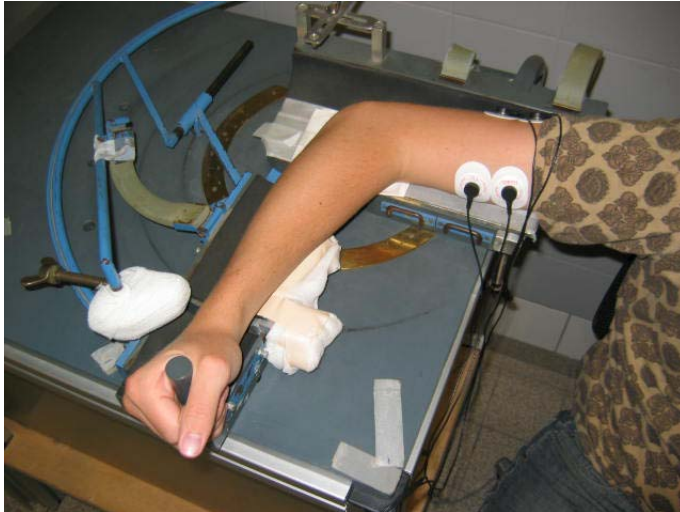


Abbildung 4.2: Lagerung des Armes auf dem Potentiometertisch

In der oben beschriebenen Sitz- und Armposition hatte der Proband alternierende Flexions-Extensionsbewegungen im Ellenbogengelenk durchzuführen. Diese sollten sich über einen Winkel von 32° erstrecken, wobei die Endpunkte der Bewegung auf dem Potentiometertisch, für den Versuchsteilnehmer gut erkennbar, markiert waren. Die Apparatur ließ auch Bewegungen über die beiden Markierungen hinaus zu, deshalb musste der Proband seine Bewegungen willkürlich anhalten und umkehren. Hierzu musste er entweder von einer Flexions- in eine Extensionsbewegung umlenken oder umgekehrt.

4.3 Versuchsaufbau

Vor Untersuchungsbeginn wurde jedem Probanden der Untersuchungsablauf ausführlich erläutert. Die Untersuchung bestand aus 25 Einzelmessungen, wobei jede Messung eine Dauer von 24 Sekunden hatte. Es handelte sich hierbei entweder um eine Messung ohne Frequenzvorgabe ($n = 13$) oder um eine Messung, bei der der Proband eine durch ein Metronom vorgegebene Frequenz einhalten sollte ($n = 12$). Diese Messungen wurden alternierend dargeboten, das heißt einer Messung ohne Frequenzvorgabe folgte stets eine Messung mit Vorgabe durch das Metronom und umgekehrt. Der Ablauf der Messungen wird im Folgenden noch genauer erläutert.

Bei dem verwendeten Metronom handelte es sich um einen computergesteuerten Taktgeber. Die Frequenzvorgabe erfolgte hierbei akustisch über zwei Lautsprecher, die Lautstärke wurde

dem Hörvermögen des Probanden angepasst. Dabei wurde die Frequenz des Taktes stets auf zwei Dezimalen genau eingestellt.

Es wurde dem Probanden erläutert, dass bei der Durchführung der Untersuchung verschiedenen Anforderungen Folge geleistet werden sollte. Zum einen sollten die Unterarmbewegungen möglichst „flüssig“ ausgeführt werden, ein Warten an den Umkehrpunkten sollte also vermieden werden. Zum anderen sollten die beiden Endpunkte der Bewegung, welche deutlich gekennzeichnet waren, möglichst exakt eingehalten werden.

Dem Probanden wurden mit Hilfe des Metronoms exemplarisch verschiedene Frequenzen vorgegeben. Dann wurde er aufgefordert einer Frequenz von 0,4 Hz zu folgen. Hierbei sollte jeder Metronomschlag mit einem Umkehrpunkt zusammenfallen. Es wurde überprüft, ob der Proband die Anweisungen verstanden hatte und die Bewegungen nach oben genannten Gesichtspunkten ausgeführt wurden. Wenn nötig erfolgte eine erneute Erläuterung des Versuchsablaufes oder eine Demonstration des Bewegungsablaufes durch den Untersucher.

Zu Beginn der Messung wurde der Proband aufgefordert repetitive Flexions-Extensionsbewegungen ohne Metronomvorgabe durchzuführen. Er sollte eine Geschwindigkeit wählen, die ihm angenehm erschien und von der es ihm möglich war, diese zu reduzieren und zu steigern. Im Folgenden wird unter dieser Frequenz die *Eigenfrequenz* des Probanden verstanden. Diese *Eigenfrequenz* sollte zwischen 0,2 Hz bis 0,8 Hz liegen, um die Untersuchungsbedingungen einheitlich zu gestalten. Nach einer Einschwingphase von 30 Sekunden wurde die erste Test-Messung durchgeführt, der Proband wurde währenddessen aufgefordert, sich die Geschwindigkeit dieser Bewegung einzuprägen.

Nun wurden die Frequenzvorgaben für die Messungen mit Metronomvorgabe ermittelt. Dazu wurde die gemessene Frequenz aus der Test-Messung mit 1,3 beziehungsweise 0,7 multipliziert, das heißt die in der Test-Messung ermittelte *Eigenfrequenz* bildete die rechnerische Grundlage der nachfolgenden Frequenzvorgaben. Jetzt begann der eigentliche Teil der Untersuchung, die sich aus den verschiedenen Einzelmessungen nach dem in *Abbildung 4.3* gezeigten Schema zusammensetzt.

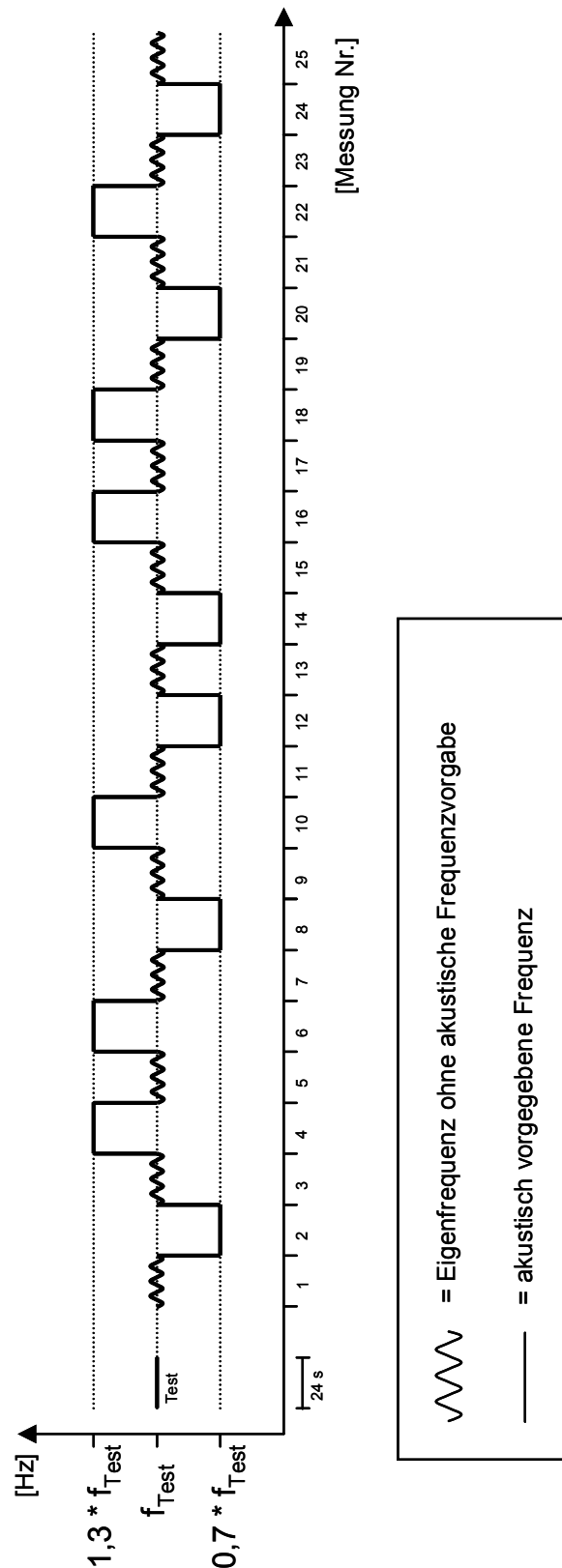


Abbildung 4.3: Verlauf der Frequenzen

Die gesamte Untersuchung bestand aus 25 Einzelmessungen zu jeweils 24 Sekunden. Entweder sollte die in der Testmessung generierte Frequenz ohne Metronomvorgabe reproduziert werden (Eigenfrequenz), oder die Unterarmbewegungen sollten an einen durch ein Metronom vorgegebenen Takt angepasst werden. Hierbei handelte es sich, wie der Abbildung zu entnehmen ist, um Frequenzen, die sich von dem in der Test-Messung generierten Takt um den Faktor 0,7 beziehungsweise 1,3 unterschieden.

Wie in *Abbildung 4.3* gezeigt, begann die Untersuchung mit einer Messung ohne Metronomvorgabe. Daraufhin erfolgten alle Messungen mit einer ungeraden Zahl, also Messung 1, 3, 5, 7, 9,..., 25 ohne Metronomvorgabe. Diese Messungen sind in der Abbildung durch eine wellenförmige Linie gekennzeichnet. Während dieser Messungen der *Eigenfrequenz* sollte der Proband die von ihm in der Test-Messung generierte Geschwindigkeit möglichst exakt reproduzieren. Zwischen diesen Messungen ohne Metronomvorgabe lag jeweils eine Messung mit Frequenzvorgabe durch das Metronom. In der Abbildung sind die Messungen mit Metronomvorgabe durch gerade waagrechte Striche dargestellt.

Bei den Messungen mit Metronomvorgabe musste der Proband seine alternierenden Unterarmbewegungen möglichst rasch und exakt mit dem vorgegebenen Takt synchronisieren. Hierzu musste er die Geschwindigkeit der Armbewegungen entweder reduzieren oder erhöhen. Die langsame Frequenzvorgabe erfolgt in Messung 2, 8, 12, 14, 20 und 24. Die Metronomvorgabe erfolgte hierbei mit einem Takt, der 70 % der Frequenz der Test-Messung betrug. Die schnelle Frequenzvorgabe, welche 130 % der Frequenz der Test-Messung betrug, wurde in Messung 4, 6, 10, 16, 18 und 22 dargeboten (siehe *Abbildung 4.3*). Die Abfolge dieser Frequenzvorgaben, das heißt ob ein langsamer oder ein schneller Takt vorgegeben wurde, erfolgte in randomisierter Reihenfolge. Dem Probanden war also nicht bekannt, welche Frequenzvorgabe als nächstes erfolgen würde, er musste den Takt zunächst auditiv wahrnehmen, um dann die Unterarmbewegungen der jeweiligen Geschwindigkeit anzupassen.

Das Ankündigen der nächsten Einzelmessung beschränkte sich auf den Hinweis „Jetzt das Metronom“ beziehungsweise „Jetzt die Eigenfrequenz“ durch den Untersucher. Gleichzeitig wurde die neue Messung gestartet und das Metronom gestartet beziehungsweise angehalten. Es fand also zu keinem Zeitpunkt eine Unterbrechung der repetitiven Armbewegung statt. Das heißt während der gesamten Untersuchung, also im Zeitraum der 25 durchgeführten Messungen, wurden vom Probanden kontinuierlich Flexions-Extensionsbewegungen dargeboten, lediglich die Geschwindigkeit variierte von Messung zu Messung.

4.4 Geräte und Datenregistrierung

In der *Abbildung 4.4* ist der Versuchsaufbau schematisch dargestellt. Der Untersucher bediente hierbei den Computer und den computergesteuerten Taktgeber. Der Datenstrom von Potentiometer und EMG wurde vom Computer aufgezeichnet und in Form einer Datentabelle ausgegeben.

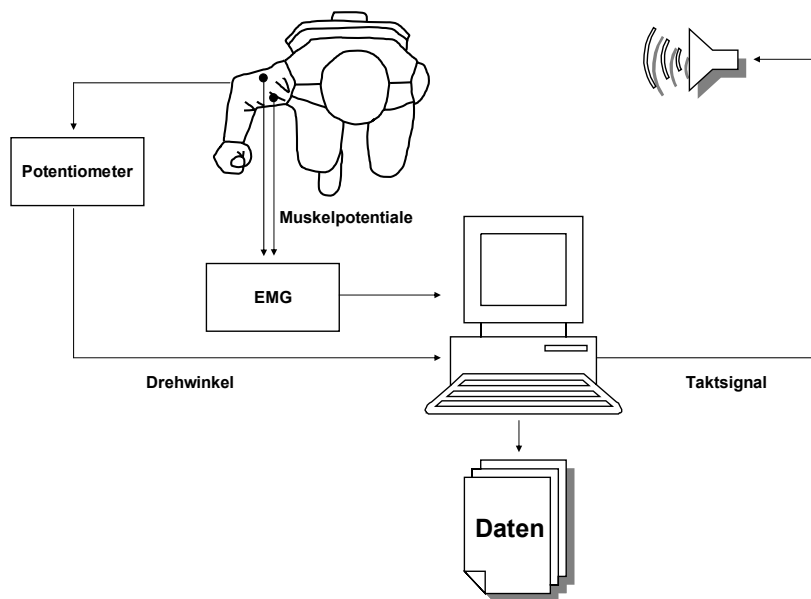


Abbildung 4.4: Geräte und Datenregistrierung

4.4.1 EMG

Das Elektromyogramm (EMG) wurde mit bipolaren Oberflächen Elektroden abgeleitet. Diese wurden auf die Muskelbäuche des M. biceps brachii und des M. triceps brachii geklebt. Der Elektrodenabstand betrug hierbei circa 1,5 cm in longitudinaler Verlaufsrichtung des Muskels. Die Erdung befand sich am linken Handgelenk. Eingesetzt wurde ein kommerzielles EMG – Gerät der Firma Schwarzer MS 6000. Die Filtereinstellung betrug 50 bis 500 Hz, die Abtastrate 1000 Hz.

4.4.2 Potentiometer

Mit Hilfe des Potentiometers wurde der mechanische Bewegungsausschlag des Unterarmes aufgezeichnet. Es handelte sich hierbei um einen Drehregler, mit dem man die Spannung in einem elektrischen Kreis verändern konnte. Hierbei betrug die Abtastrate 1000 Hz. Die Ermittlung der Eichgeraden erfolgte mit der Annahme, dass sich der Drehwinkel im Bereich der auszuführenden Bewegung linear zur Spannung verhält. Mittels dieser Eichkurve erhielten wir folgende Formel, mit der es möglich war, jedem vom Potentiometer angegebenen Spannungswert einen bestimmten Winkel (in °) zuzuordnen:

$$Winkel[Grad] = 35,4 \left[\frac{Grad}{Volt} \right] * Spannung[Volt] + 144,4[Grad]$$

4.4.3 Datenregistrierung

Insgesamt wurden drei Datenkanäle simultan mit dem Programm LabView Version 5.1 (National Instruments Corp., Austin, Texas, USA) aufgezeichnet. Kanal 1 und 2 gaben das EMG des M. biceps beziehungsweise M. triceps brachii wieder. Kanal 3 enthielt das Potentiometersignal mit den mechanischen Auslenkungen des Unterarmes. Dadurch wurde eine eindeutige Zuordnung der Muskelpotentiale zu den ausgeführten Bewegungen möglich. Außerdem konnten die Bewegungsamplituden und der zeitliche Verlauf der Unterarmbewegungen beurteilt werden.

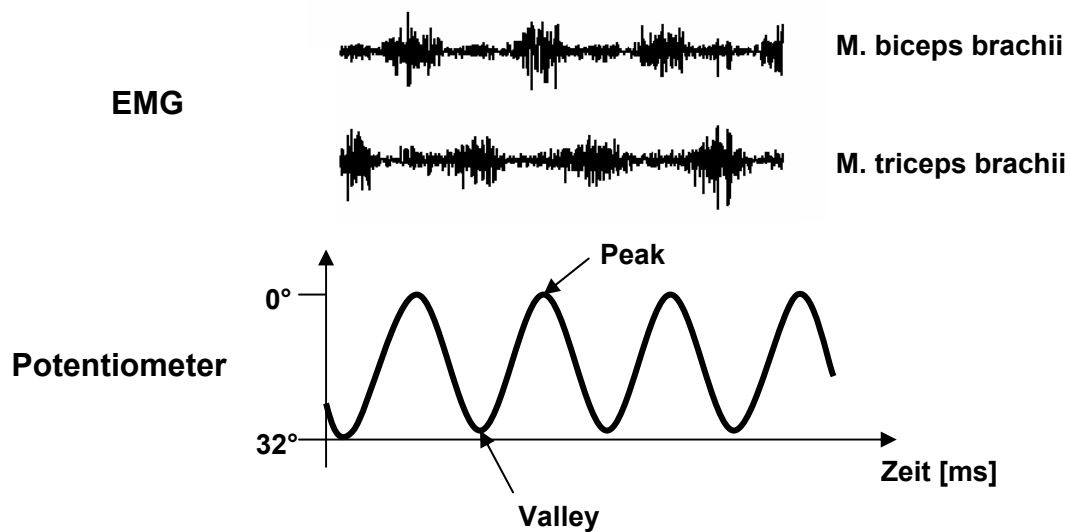


Abbildung 4.5: EMG- und Potentiometersignale im zeitlichen Verlauf

4.5 Auswertung

Mit einem Auswertungsprogramm, das von Dr. rer. med. C. Krick geschrieben wurde, konnten anhand der mit LabView erhobenen Daten die Koordinaten der Umlenkpunkte bestimmt werden. Hierbei entsprachen die „Peaks“, wie in *Abbildung 4.5* gezeigt, einer Unterarmposition in 0° Stellung. Das heißt zu diesem Zeitpunkt war der Arm im Ellenbogengelenk, gemessen am vorgegebenen Bewegungsumfang, maximal gebeugt. Die „Valleys“ entsprachen einer Unterarmposition in 32° Stellung, also der, im vorgegebenen Rahmen, maximalen Streckung im Ellenbogengelenk. Die Koordinaten der einzelnen Umlenkpunkte setzen sich aus dem tatsächlich erreichten Winkel der Armauslenkung in Grad (y-Koordinate) und der zugehörige Zeit in Millisekunden (x-Koordinate) zusammen. Der genaue Zusammenhang zwischen Armauslenkung und zugehörigem Potentiometersignal kann der *Abbildung 4.5* entnommen werden.

Im Folgenden werden die erfassten Parameter beschrieben, welche statistisch ausgewertet wurden. Ihre Berechnung beruht auf den oben beschriebenen Daten, also der x- und y-Koordinaten der Umlenkpunkte der Armbewegungen.

4.5.1 halbe Periodendauer

Aus den Koordinaten der einzelnen Umkehrpunkte wurde die jeweilige Zeit in Millisekunden ermittelt, die für eine Unterarmbewegung zwischen 0° und 32° und umgekehrt benötigt wurde. Dies ist die jeweilige vom Probanden erreichte *halbe Periodendauer*. Sie bildet mathematisch gesehen die Hälfte des Kehrwertes der jeweils erzielten Frequenz ($\text{halbe Periodendauer} = 1/(2 \cdot f)$). Wie bereits in *Kapitel 4.3* erläutert, sollte jeder Metronomschlag mit einem Umkehrpunkt zusammen fallen. Das Intervall zwischen zwei Metronomschlägen stellt somit die vorgegebene *halbe Periodendauer* dar, mit der die vom Probanden erreichte *halbe Periodendauer* direkt verglichen werden konnte.

Die *halbe Periodendauer* ist in *Abbildung 4.6* schematisch dargestellt. Diese *halben Periodendauern* wurden nun im zeitlichen Verlauf dargestellt. Sie wurden hierzu in Folge in ein Diagramm eingetragen. So konnte man Änderungen der Geschwindigkeit der Armbewegung sichtbar machen. Dieses Diagramm bildete auch die Grundlage für die Einteilung der Messung in die Phase der Frequenzadaptation und die stationäre Phase. Der Verlauf der *halben Periodendauern* sowie die beiden Phasen einer Messung sind exemplarisch in *Abbildung 4.7* dargestellt.

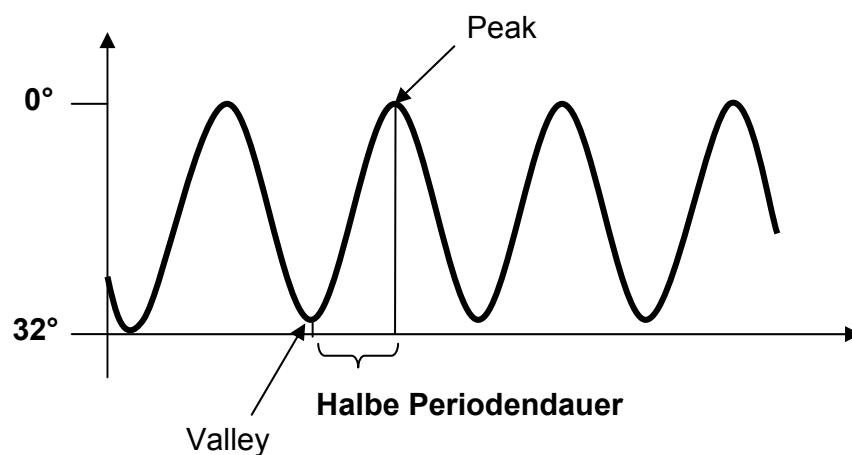


Abbildung 4.6: Berechnung der *halben Periodendauer*

Der Parameter *halbe Periodendauer* und die Darstellung des Verlaufes dieses Parameters bildet also die Grundlage für die im Folgenden beschriebenen Parameter. Des Weiteren wurde die durchschnittliche *halben Periodendauern* während der Test-Messung errechnet. Dieser Durch-

schnittswert bildet, als Maß für die generierte Frequenz, die rechnerische Grundlage der Taktvorgabe durch das Metronom. Er wurde nur für die Test-Messung berechnet, da alle darauf folgenden Messungen, wie folgend beschrieben, in eine Adaptationsphase und eine stationäre Phase unterteilt wurden und so ein über die gesamte Messung gemittelter Wert nutzlos wird.

4.5.2 Adaptationsphase

4.5.2.1 Festlegung der Adaptationsphase

Zunächst wurde aus der in der Testmessung generierten Frequenz die vorgegebenen *halben Periodendauern* berechnet (siehe *Abschnitt 4.5.1*). Anhand eines in *Abbildung 4.7* exemplarisch gezeigten Diagramms wurde dann der Zeitpunkt des Erreichens der vorgegebenen halben Periodendauer optisch durch zwei unabhängige Untersucher vorgenommen. Den beiden Untersuchern war weder die Identität des jeweiligen Probanden, dessen Messung analysiert wurde, noch dessen Gruppenzugehörigkeit bekannt.

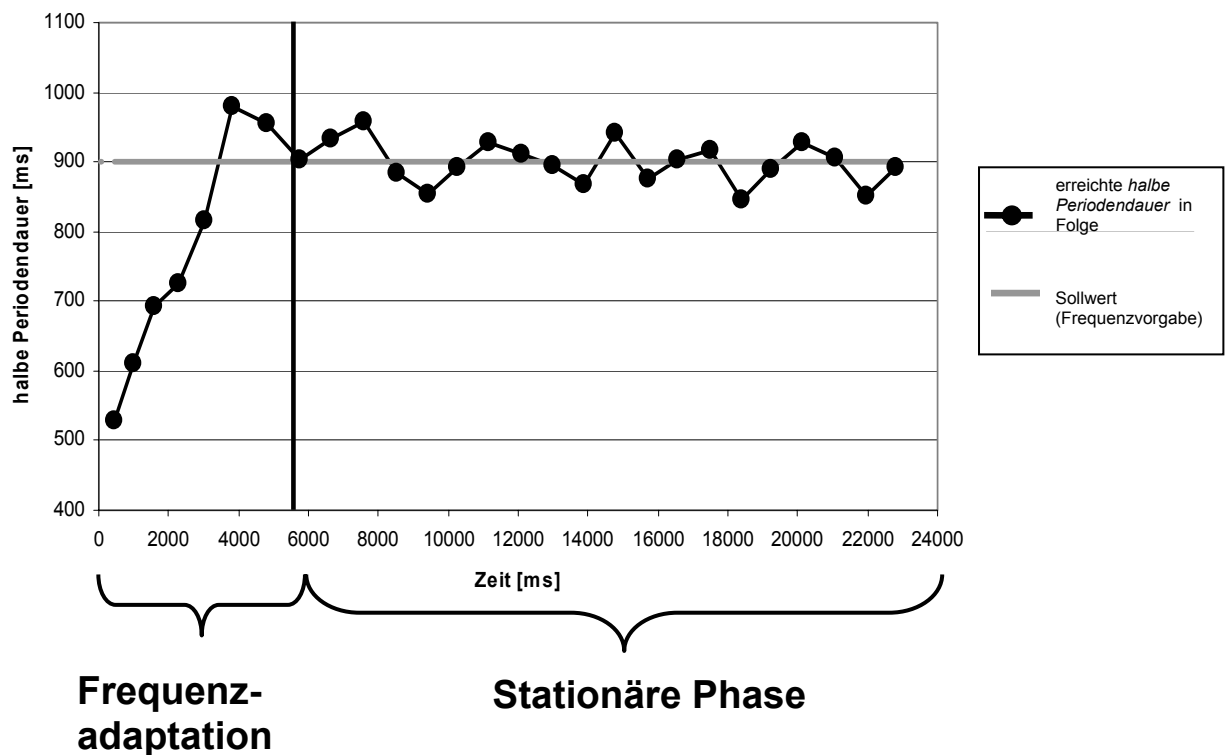


Abbildung 4.7: Frequenzadaptation und stationäre Phase bei akustischer Frequenzvorgabe

Bei der Auswertung galt das Kriterium, dass die Frequenzvorgabe so genau wie möglich realisiert werden sollte. Bei Messungen mit Metronomvorgabe wurde die erreichte *halbe Periodendauer* direkt mit der vorgegebenen *halben Periodendauer* verglichen. Bei den Messungen der *Eigenfrequenz* erhielten die Probanden keine Taktvorgabe, somit gab es auch keine vorgegebene *halbe Periodendauer*. Hier wurde das Erreichen der *Eigenfrequenz* mit dem Erreichen eines „steady-state“ gleichgesetzt. Das heißt, die Phase der Frequenzadaptation wurde als die Zeit definiert, die der Proband benötigt, um seine Armbewegungen auf eine stabile Frequenz einzupendeln. Der nachfolgende Zeitraum, von vollzogener Frequenzadaptation bis zum Ende der jeweiligen Messung, wird, wie in *Abbildung 4.7* dargestellt, als stationäre Phase definiert.

Die Festlegung des Zeitpunktes der Frequenzadaptation wurde, wie oben beschrieben, von zwei unabhängigen Untersuchern vorgenommen. Nur bei 16 von 1250 durchgeführten Messungen, das entspricht 1,3 % aller Messungen, legten die beiden Untersucher einen unterschiedlichen Adaptationszeitpunkt fest. In einem solchen Fall wurde, in Absprache mit Herrn Georg vom biometrischen Institut der Universität des Saarlandes, nach dem Zufallsprinzip einer der beiden Adaptationszeitpunkte ausgewählt. Das arithmetische Mittel konnte nicht gebildet werden, da ein so errechneter Adaptationszeitpunkt in den meisten Fällen nicht mit dem Umkehrpunkt einer Armbewegung zusammenfiel und so die nachfolgenden Berechnungen verfälscht hätte.

Um die Phase der Frequenzadaptation unabhängig von der jeweils gewählten Geschwindigkeit der Unterarmbewegungen darzustellen, wurde zusätzlich die für die Adaptation benötigte Anzahl an Unterarmbewegungen erfasst. Hierzu wurde die Anzahl der Umlenkpunkte gezählt, die bis zur Frequenzadaptation durchlaufen wurden. Bei dem in *Abbildung 4.7* dargestellten Bewegungsablauf wurden zum Beispiel acht Unterarmbewegungen bis zur Adaptation benötigt.

4.5.2.2 Fixe Adaptationszeit von 10 Sekunden

Eine andere Möglichkeit die Genauigkeit und Regelmäßigkeit der repetitiven Unterarmbewegungen zu erfassen, ist die Festlegung einer definierten Adaptationszeit. In dieser Arbeit wurde alternativ zum oben dargestellten Vorgehen eine Auswertung vorgenommen, die auf einem festgelegten Adaptationszeitpunkt von $t = 10$ Sekunden beruht. Es wurde angenommen, dass zu die-

sem Zeitpunkt die Frequenzadaptation abgeschlossen sei und so isoliert die Zeitspanne von 10 bis 24 Sekunden betrachtet. Vorteil dieser Art der Auswertung ist, dass die subjektive Komponente der beiden Untersucher, welche die Adaptationszeit festlegen, entfällt. Nachteilig ist jedoch der Informationsverlust, da sich die Parameter *Adaptationszeit* und *Adaptation nach Anzahl der Unterarmbewegungen* erübrigen. Um eine solche Form der Auswertung zu überprüfen, wurden verschiedene Testmessungen mit gesunden Kontrollpersonen und Parkinsonpatienten durchgeführt.

Bei der Auswertung mit festgelegtem Adaptationszeitpunkt zeigte sich ein signifikanter Unterschied zwischen langsamer und schneller Taktvorgabe hinsichtlich der Genauigkeit und Regelmäßigkeit der Unterarmbewegungen. Dieser signifikante Unterschied war in der statistischen Auswertung, die auf visuell festgelegten Adaptationszeitpunkten beruhte, nicht zu finden. Trotzdem wurde die visuelle Auswertung bevorzugt. Dies hat folgenden Grund: Die zusätzlichen Signifikanzen wurden durch eine überproportionale Zunahme der Ungenauigkeit und Unregelmäßigkeit bei langsamer Taktvorgabe innerhalb der Gruppe der Parkinsonpatienten verursacht. Um den Grund für diese überproportionalen Veränderungen zu finden, wurden die benötigten Adaptationszeiten bei langsamer Frequenzvorgabe genauer untersucht.

In der Gruppe der Parkinsonpatienten zeigte sich, dass nach visueller Auswertung in ungefähr 25 % der Messungen eine Adaptationszeit benötigt wurde, die länger als 10 Sekunden betrug. Dahingegen wurden nur in 8 % der Messungen der altersgematchten Kontrollgruppe und in 1 % der Messungen der jungen Kontrollgruppe mehr als 10 Sekunden für die Anpassung benötigt. Jeder vierte Parkinsonpatient ist zu diesem Zeitpunkt ($t = 10 \text{ s}$) noch nicht an die vorgegebene Frequenz adaptiert oder hat seine Bewegungen noch nicht auf ein stabiles Niveau eingependelt. Wenn diese Zeitspanne nun aber zur stationären Phase zählt, führt dies zu einer Zunahme der Unregelmäßigkeit und Ungenauigkeit der Armbewegungen in dieser Phase. Die überproportional verlängerten Adaptationszeiten in der Parkinsongruppe bei langsamer Taktvorgabe führten so zu falsch positiven Signifikanzen in der stationären Phase. Deshalb wurde auf eine solch „objektive“ Auswertung verzichtet und die Zeitspanne der Anpassung visuell durch zwei unabhängige Untersucher ausgewertet.

4.5.3 Streubreite in der stationären Phase

Nach vollzogener Frequenzadaptation (wie in *Abschnitt 4.5.2.1* beschrieben) wurde die *Streubreite* in der stationären Phase ermittelt. Hierzu wurden, wie in *Abbildung 4.8* dargestellt, die Differenzen zwischen der jeweils tatsächlich erreichten *halben Periodendauer* und der vorgegebenen *halben Periodendauer* gebildet. Unter dem Parameter *Streubreite* wird im Folgenden der Mittelwert der Beträge dieser Differenzen (in ms) verstanden. Die vorgegebene *halbe Periodendauer* wurde, wie in *Kapitel 4.5.1* beschrieben, aus der in der Testmessung generierten Frequenz berechnet.

Die *Streubreite* ist ein Maß für die Genauigkeit, mit der der Versuchsteilnehmer, nach erfolgter Frequenzadaptation, die vorgegebene Geschwindigkeit einhielt. Eine hohe *Streubreite* bedeutet somit, dass die einzelnen Unterarmbewegungen nicht akkurat zum Taktgeber ausgeführt wurden. Die Differenzen zwischen der erreichten *halben Periodendauer* und der vorgegebenen *halben Periodendauer* (Sollwert) sind in *Abbildung 4.8* als senkrechte Striche eingezeichnet.

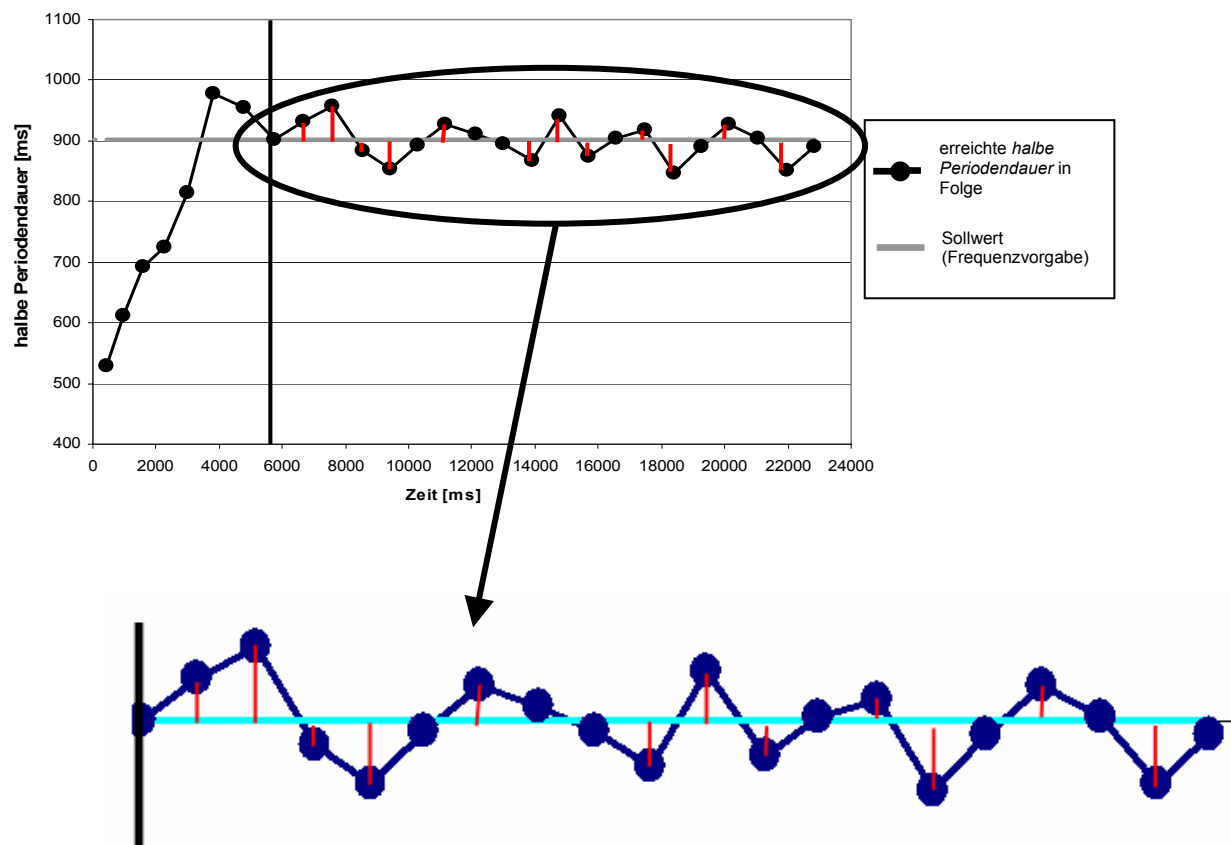


Abbildung 4.8: graphische Darstellung des Parameters *Streubreite*

Der Parameter *Streubreite* bildet den Mittelwert der Differenzen zwischen dem Sollwert der Frequenzvorgabe und der erreichten *halben Periodendauer* während der stationären Phase. Der Sollwert richtet sich nach der in der Testmessung generierten Frequenz. Die jeweiligen Differenzen sind in der obigen Abbildung als senkrechte Striche eingezeichnet.

4.5.4 Abweichung der durchschnittlichen halben Periodendauer

Zur Berechnung des Parameters *Abweichung* wurde zunächst der Durchschnitt aller, in der stationären Phase generierten, *halben Periodendauern* gebildet. Dann wurde errechnet, wie weit dieser Durchschnitt von der vorgegebenen *halben Periodendauer* abwich. Diese *Abweichung* wurde, um einen Vergleich zwischen den Probanden und den einzelnen Messungen möglich zu machen, als positiver oder negativer Prozentwert der vorgegebenen *halben Periodendauer* ausgedrückt.

Im Gegensatz zur *Streubreite* (siehe *Kapitel 4.5.3*) erhielt man hierbei die Information, wie weit der Teilnehmer, nach vollzogener Frequenzadaptation, die vorgegebene Frequenz im Mittel unter- oder überschritt. Die *Abweichung* ist somit ein Maß für die Richtigkeit der ausgeführten Unterarmbewegungen, wobei die Richtigkeit die Übereinstimmung von tatsächlich erreichtem und vorgegebenem Wert wiedergibt. Eine niedrige *Abweichung* geht mit einer hohen Richtigkeit und somit mit einem niedrigen systematischen Fehler einher.

Zur Veranschaulichung ist ein Beispiel in *Abbildung 4.9* gezeigt. Hier schlug der Proband einen Takt, bei dem die durchschnittliche Periodendauer in der stationären Phase im Mittel zu lang war, die vorgegebene halbe *Periodendauer* war 1515 ms, die durchschnittlich erreichte *halbe Periodendauer* 1683 ms lang. Die Angabe erfolgte in „+“ wenn die Geschwindigkeit des Teilnehmers zu schnell war, der durchschnittliche Abstand also zu kurz war, beziehungsweise in „-“ wenn der Takt zu langsam geschlagen wurde. In diesem Beispiel zeigte der Proband demnach eine *Abweichung* von -11,1 % vom Sollwert.

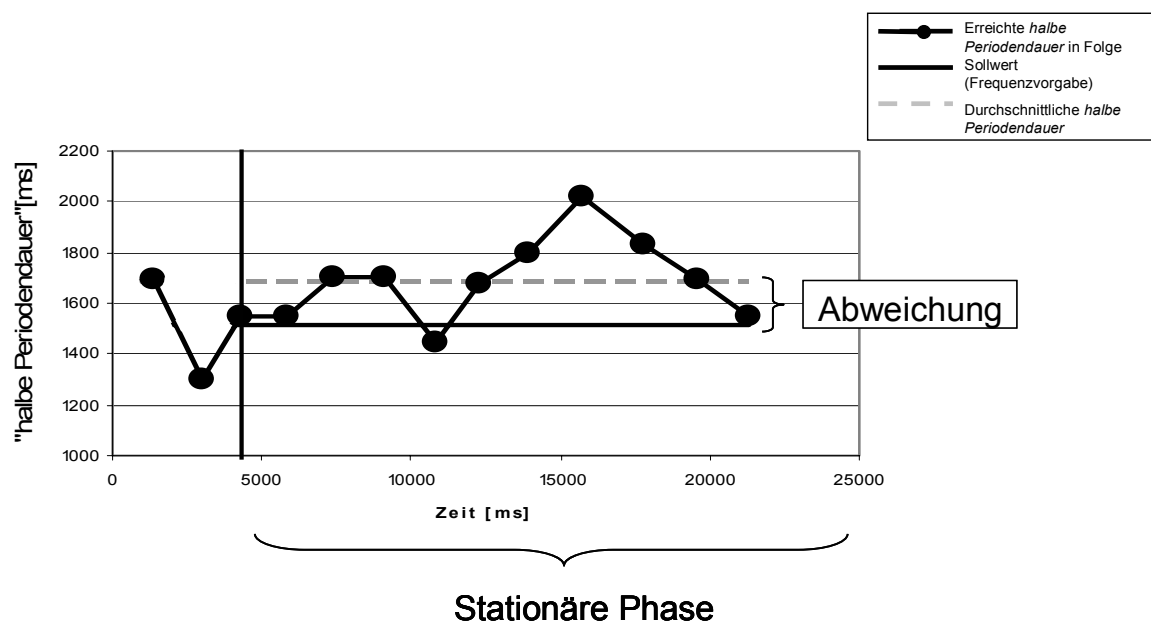


Abbildung 4.9: graphische Darstellung des Parameters *Abweichung* der durchschnittlichen halben Periodendauer

Der Parameter *Abweichung* der durchschnittlichen halben Periodendauer berechnet sich aus der Differenz zwischen der vorgegebenen *halben Periodendauer* und dem Durchschnitt aller in der stationären Phase generierten *halben Periodendauern*. Die *Abweichung* ist somit ein Maß dafür wie weit der Proband die vorgegebene Frequenz in der stationären Phase im Mittel unter- oder überschritt.

4.5.5 Standardabweichung der halben Periodendauer

Die *Standardabweichung* der halben Periodendauer in der stationären Phase wurde, ebenso wie der in *Abschnitt 4.5.4* beschriebene Parameter *Abweichung*, als Prozentwert der vorgegebenen *halben Periodendauer* ausgedrückt. Sie ist ein Maß für die Präzision, mit der der jeweilige Takt geschlagen wurde, da sie die Übereinstimmung der *halben Periodendauern* der sich wiederholenden Unterarmbewegungen wiedergibt. Die Standardabweichung ist somit auch ein Maß für die Regelmäßigkeit der Bewegungsausführung. Eine hohe Standardabweichung spricht für einen hohen zufälligen Fehler bei der Terminierung der Bewegungen.

4.5.6 Werte im Zielbereich

Mit diesem Parameter wurde untersucht, wie viele der *halben Periodendauern* in einem Zielbereich von $\pm 10\%$ vom Sollwert der *halben Periodendauer* lagen. Die Berechnung erfolgt über die gesamten 24 Sekunden jeder Messung und wurde als Prozentwert wiedergegeben. Man erhält so einen Wert, der zum einen von der Adaptationszeit, zum anderen aber auch von der *Streubreite* und der *Abweichung* beeinflusst wird. Je später die Adaptation erfolgt beziehungsweise je größer die *Streubreite* oder die *Abweichung* sind, desto weniger der Werte liegen im Zielbereich.

4.5.7 Durchschnittliche Amplitudenabweichung

Durch die Bestimmung des erreichten Winkels der Armauslenkung für jede Bewegungsperiode wurde ermittelt, wie genau der Teilnehmer den jeweiligen Umlenkpunkt eingehalten hatte. Hieraus ergab sich eine *Abweichung* vom Soll-Umlenkpunkt in Grad, die entweder durch eine Umkehr vor Erreichen des markierten Punktes ($-\circ$) oder eine Bewegung über den gekennzeichneten Punkt hinaus ($+\circ$) begründet lag. Für jede der 25 Messungen wurde so die durchschnittliche Amplitudenabweichung bestimmt. Die Amplitudenabweichungen der Beuge- und Streckbewegungen wurden getrennt voneinander ausgewertet.

4.6 Statistische Methoden

Zur statistischen Auswertung wurden Microsoft Excel 5.0 und SPSS 11.5 verwendet. Mittels SPSS wurden Mittelwerte und Standardabweichungen berechnet und eine univariate Varianzanalyse durchgeführt. Anschließend wurde ein Lern- oder Ermüdungseffekt im Verlauf der Messungen mit einer linearen Regressionsanalyse untersucht.

4.6.1 Univariate Varianzanalyse

Bei der univariaten Varianzanalyse wurden als unabhängige Faktoren die Parameter *Gruppe* und *Sprung* definiert. Das heißt jeder zu analysierende Parameter wurde auf Unterschiede zwischen den drei Probandengruppen und den vier *Sprüngen* untersucht. Ein *Sprung* ist hierbei die Änderung der Geschwindigkeit der Unterarmbewegung, die nötig ist, um sich an eine neue Frequenz anzupassen. Der Verlauf der Frequenzen ist in *Abbildung 4.3 (Seite 22)* genau dargestellt. Die vier *Sprünge* sind:

- Umstellung (*Sprung*) von der *Eigenfrequenz* auf die langsame Frequenzvorgabe: diese langsame Frequenzvorgabe wird in den folgenden Diagrammen aus Platzgründen mit „0,7“ bezeichnet, da die Frequenz das 0,7 fache der Testfrequenz darstellt
- Umstellung (*Sprung*) von der langsamen Frequenzvorgabe auf die *Eigenfrequenz*: diese *Eigenfrequenz* nach langsamer Frequenzvorgabe wird in den folgenden Diagrammen aus Platzgründen als „0,7 -> 1,0“ bezeichnet
- Umstellung (*Sprung*) von der *Eigenfrequenz* auf die schnelle Frequenzvorgabe: diese schnelle Frequenzvorgabe wird, da sie das 1,3 fache der Test-Frequenz darstellt, in den folgenden Diagrammen als „1,3“ bezeichnet
- Umstellung (*Sprung*) von der schnellen Frequenzvorgabe auf die *Eigenfrequenz*: diese *Eigenfrequenz* nach schneller Frequenzvorgabe wird in den folgenden Diagrammen als „1,3 -> 1,0“ bezeichnet

Die nachfolgenden Post-Hoc-Teste schlüsselten die Unterschiede zwischen den drei Probandengruppen und den vier verschiedenen *Sprüngen* genauer auf. Es wurden hierbei Mehrfachvergleiche durchgeführt. Dadurch war zu erkennen, zwischen welchen Probandengruppen und wel-

chen *Sprüngen* die Unterschiede lagen. Es wurden also p-Werte für den Vergleich der einzelnen Gruppen untereinander und p-Werte für den Vergleich der einzelnen *Sprünge* untereinander ausgegeben. Ihnen war dann zu entnehmen, bei welchen Vergleichen signifikante Unterschiede vorlagen ($p < 0,05$). Außerdem wurden die Faktoren *Gruppe* und *Sprung* auf Wechselwirkungen untersucht. Wenn dies der Fall war ($Gruppe * Sprung < 0,05$), konnte man keine allgemeingültige Aussage treffen, deshalb wurde eine weitere univariate Varianzanalyse durchgeführt. Hierbei wurde für jeden einzelnen *Sprung* ein getrennter Gruppenvergleich durchgeführt beziehungsweise für jede einzelne Gruppe ein getrennter Vergleich der *Sprünge*. Dies war bei den Parametern *Adaptationszeit [ms]* und *Adaptation nach Anzahl der Unterarmbewegungen* der Fall. Wenn der Test auf Wechselwirkungen keine Signifikanz ergab, konnte auf solch einen getrennten Gruppenvergleich beziehungsweise Vergleich der *Sprünge* verzichtet werden.

4.6.2 Lineare Regression

Um einen Lern- oder Ermüdungseffekt zu untersuchen, wurde mit SPSS eine lineare Regressionsanalyse durchgeführt. Hier wurde, nach *Gruppen* und *Sprüngen* getrennt, der Verlauf eines Parameters genauer untersucht. Die Regressionsanalyse dient der Untersuchung der Frage, ob die Probanden nach mehreren Wiederholungen eine Frequenz schneller erreichen oder genauer einhalten können als zu Beginn der Untersuchung. In einem solchen Fall würde man von einem Lerneffekt ausgehen. Zum anderen soll untersucht werden, ob die Adaptationsphase länger oder die *Streubreite* größer ist als zu Beginn der Untersuchung, dies würde einem Ermüdungseffekt entsprechen. Hierzu wurden die Parameter *Adaptationszeit [ms]* und *Streubreite* untersucht. Eine zusätzliche Betrachtung des Parameters *Adaptation nach Anzahl der Unterarmbewegungen* ist hierbei nicht nötig, da keine direkten Gruppenvergleiche angestellt werden. Die Ergebnisse der linearen Regressionsanalyse finden sich in *Kapitel 5.8 (Seite 66)*.

4.7 Statistischen Auswertung

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der univariaten Varianzanalyse präsentiert. Hierbei wird in der gleichen Reihenfolge vorgegangen wie die Parameter in *Kapitel 4.5* beschrieben wurden. Alle untersuchten Parameter sind hier der Übersicht halber nochmals in einer Liste dargestellt:

1. *halbe Periodendauer* während der Testmessung: direktes Maß für die durchschnittliche Frequenz, mit der der Versuchsteilnehmer die Unterarmbewegungen ausführt. Die Darstellung der *halben Periodendauern* in Folge bildet die Grundlage der im Folgenden beschriebenen Parameter.
2. Parameter der Adaptationsphase
 - 2.1 *Adaptationszeit [ms]*: Zeitspanne, die der Teilnehmer benötigt, um seine Bewegungen an den externen Taktgeber anzupassen beziehungsweise sie auf ein stabiles Niveau einzupendeln.
 - 2.2 *Adaptation nach Anzahl der Unterarmbewegungen*: Anzahl der Unterarmbewegungen, die benötigt werden, um diese an den externen Taktgeber anzupassen beziehungsweise sie auf ein stabiles Niveau einzupendeln.
3. Parameter der stationäre Phase
 - 3.1 *Streubreite*: Maß für die Genauigkeit mit der der Versuchsteilnehmer, nach vollzogener Frequenzadaptation, den vorgegebenen Takt einhält.
 - 3.2 *Abweichung* der durchschnittlichen halben Periodendauer: Maß für die Richtigkeit mit der der jeweilige Takt geschlagen wird. Die Abweichung vom dazugehörigen Sollwert wird hierbei in Prozent angegeben.
 - 3.3 *Standardabweichung* der halben Periodendauer : Maß für die Präzision und Regelmäßigkeit mit der die Unterarmbewegungen ausgeführt werden.
4. *Werte im Zielbereich*: prozentualer Anteil der *halben Periodendauern*, die während der gesamten Messung in einem Zielbereich von $\pm 10\%$ der vorgegebenen *halben Periodendauer* liegen.
5. *Amplitudenabweichung bei Beugebewegung*: durchschnittliche Abweichung des Umlenkpunktes der Armbewegung vom vorgegebenen Umlenkpunkt bei der Umkehr von Flexion in Extension in Winkelgraden.
6. *Amplitudenabweichung bei Streckbewegung*: durchschnittliche Abweichung des Umlenkpunktes der Armbewegung vom vorgegebenen Umlenkpunkt bei der Umkehr von Extension in Flexion in Winkelgraden.

In Kapitel 5.8 sind die Ergebnisse der linearen Regressionsanalyse dargestellt.

Bei der statistischen Auswertung der einzelnen Parameter wurde nach dem in *Abbildung 4.10* gezeigten Schema vorgegangen. Wie in *Kapitel 4.6.1* dargestellt, dient die univariate Varianzanalyse für die Faktoren *Gruppe* und *Sprung* als „Vortest“ für die nachfolgend durchgeführten Post-Hoc-Teste (bei $p < 0,05$). Im folgenden Kapitel werden der Übersicht halber nur die Post-Hoc-Teste tabellarisch dargestellt, der Vollständigkeit halber können die Daten der univariaten Varianzanalysen für die Faktoren *Gruppe* und *Sprung* den jeweiligen Tabellen im Anhang entnommen werden.

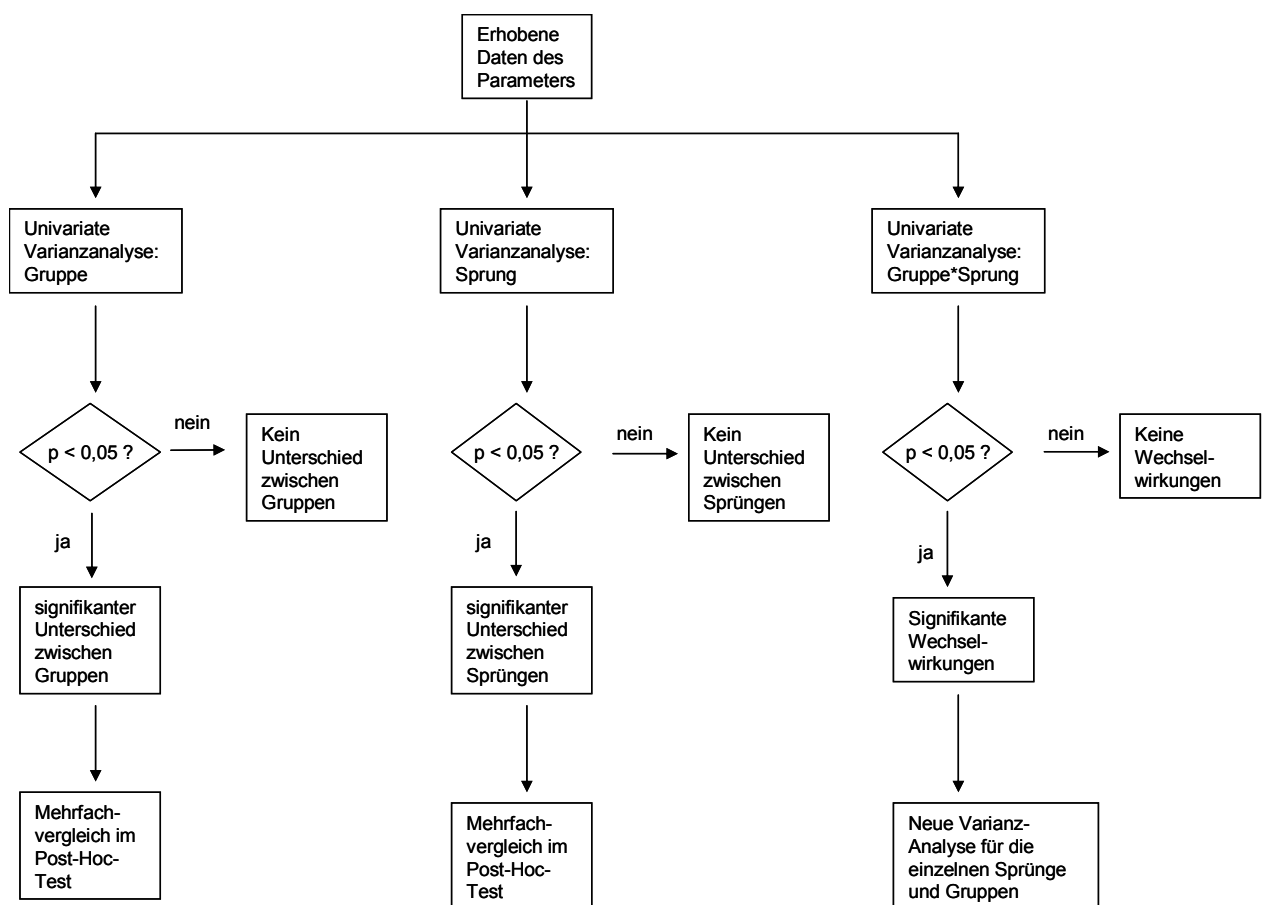


Abbildung 4.10: Vorgehen bei der statistischen Auswertung

Die Ergebnisse der statistischen Auswertung werden im folgenden Kapitel in Form von Tabellen präsentiert. Um hierbei die Übersicht zu erleichtern, sind die signifikanten Ergebnisse ($p < 0,05$) grau hinterlegt.

5 Ergebnisse

5.1 halbe Periodendauer

Das Verhältnis der Mittelwerte und Standardabweichungen des Parameters *halbe Periodendauer* ist in *Abbildung 5.1* und *Tabelle 5.1* dargestellt. Verglichen wurde hier die durchschnittliche *halbe Periodendauer* in der Testmessung, welche ein Maß für die gewählte *Eigenfrequenz* darstellt. In diesem Fall wurde die univariate Varianzanalyse nur bezüglich des Faktors *Gruppe* durchgeführt, da es sich um eine einmalig durchgeführte Messung handelte.

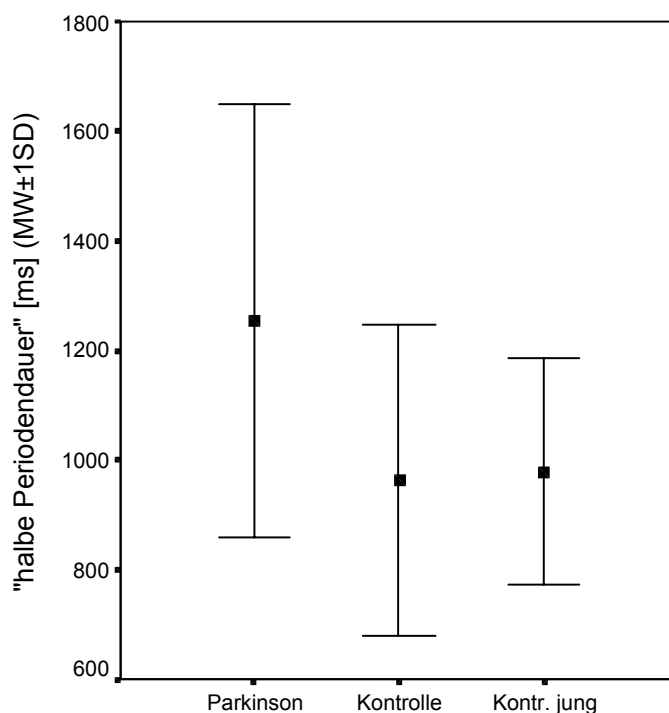


Abbildung 5.1: Mittelwerte und Standardabweichungen für *halbe Periodendauer* [ms]

Tabelle 5.1: Mittelwerte und Standardabweichungen für *halbe Periodendauer* [ms]

	Gruppe	Mittelwert [ms]	Standardabweichung
Test-Messung	Parkinson	1254,0	395,1
	Kontrolle	961,9	283,2
	Kontr. jung	978,5	206,1

Die univariate Varianzanalyse ergab einen signifikanten Gruppenunterschied ($p = 0,012$). Die genauen Daten können der *Tabelle 11.1* im Anhang entnommen werden.

Der nachfolgende Post-Hoc-Test ist in *Tabelle 5.2* dargestellt. Die Parkinsonpatienten wählten mit 1254 ± 395 ms eine signifikant längere *halbe Periodendauer* als die Probanden der altersgematchten Kontrollgruppe ($p = 0,028$), welche eine durchschnittliche *halbe Periodendauer* von 962 ± 283 ms in der Test-Messung aufwiesen. Die Probanden der jungen Kontrollgruppe wiesen eine *halbe Periodendauer* von 979 ± 206 ms auf und zeigten so ebenfalls einen signifikanten Unterschied zur Parkinsongruppe ($p = 0,045$). Kein signifikanter Unterschied ergab sich zwischen den beiden Kontrollgruppen ($p = 0,988$). Beide Kontrollgruppen wählten eine signifikant kürzere *halbe Periodendauer* als die Parkinsonpatienten, das heißt sie schlugen eine signifikant schnellere Frequenz in der Testmessung. Da diese Messung auch die Grundlage der später dargebotenen Frequenzvorgaben bildete, mussten die Probanden der Kontrollgruppen während der gesamten Untersuchung höheren Frequenzvorgaben folgen als die Parkinsonpatienten.

Tabelle 5.2: Post-Hoc-Test Gruppe für *halbe Periodendauer [ms]*

		Signifikanz
Parkinson	Kontrolle	,02808
	Kontr. jung	,04451
Kontrolle	Kontr. jung	,98793

Zusammengefasst bedeutet dies:

- Die Gruppe der Parkinsonpatienten schlug beim Generieren einer frei wählbaren Frequenz einen signifikant langsameren Takt als gesunde Kontrollpersonen.
- Eine Abhängigkeit vom Lebensalter konnte nicht nachgewiesen werden, da sich zwischen den beiden Kontrollgruppen kein signifikanter Unterschied hinsichtlich der *halben Periodendauer* in der Testmessung zeigte.

5.2 Parameter der Adaptationsphase

5.2.1 Adaptationszeit [ms]

In *Abbildung 5.2* und der *Tabelle 5.3* sind die Mittelwerte und Standardabweichungen für den Parameter *Adaptationszeit [ms]* dargestellt.

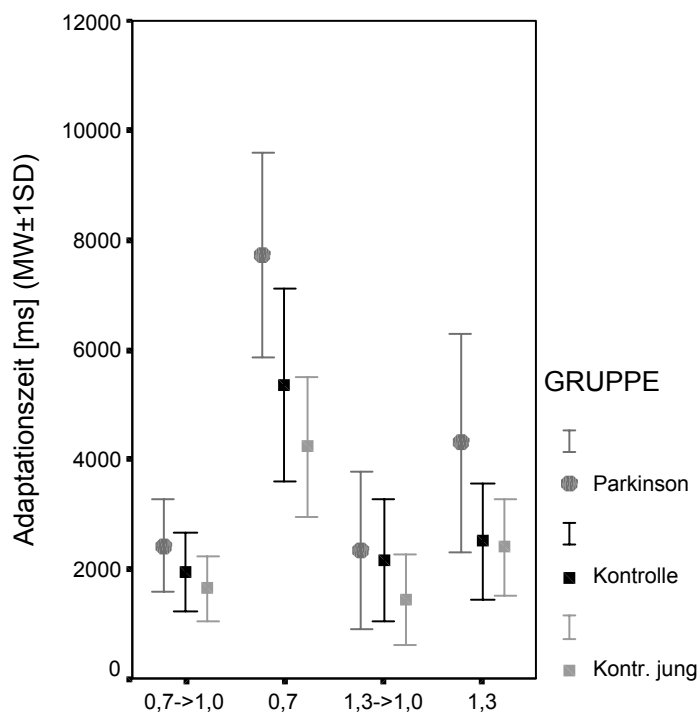


Abbildung 5.2: Mittelwerte und Standardabweichungen für *Adaptationszeit [ms]*

Tabelle 5.3: Mittelwerte und Standardabweichungen für *Adaptationszeit [ms]*

	Gruppe	Mittelwert [ms]	Standardabweichung
<i>Eigenfrequenz nach langsamer Frequenzvorgabe</i>	Parkinson	2421,3	837,7
	Kontrolle	1934,1	711,5
	Kontr. jung	1642,4	599,0
langsame Frequenzvorgabe	Parkinson	7723,3	1860,1
	Kontrolle	5349,0	1766,0
	Kontr. jung	4226,0	1273,0
<i>Eigenfrequenz nach schneller Frequenzvorgabe</i>	Parkinson	2332,0	1446,4
	Kontrolle	2156,4	1096,6
	Kontr. jung	1445,2	821,7
schnelle Frequenzvorgabe	Parkinson	4295,2	1988,6
	Kontrolle	2498,0	1057,4
	Kontr. jung	2389,5	889,3

Die univariate Varianzanalyse (*Tabelle 11.2*) ergab einen signifikanten Unterschied der benötigten Adaptationszeit zwischen den Probandengruppen ($p < 0,001$) und den *Sprüngen* ($p < 0,001$). Zur Erläuterung des Parameters *Sprung* sei nochmals die Definition in *Abschnitt 4.6.1* (*Seite 35*) verwiesen. Mit p (*Gruppe*Sprung*) $< 0,001$ zeigten sich aber auch signifikante Wechselwirkungen zwischen den beiden Parametern. Deshalb wurde im Folgenden eine univariate Varianzanalyse durchgeführt, bei der für jeden einzelnen *Sprung* ein getrennter Gruppenvergleich vorgenommen wurde. Eine nach *Gruppen* aufgeteilte Analyse ist hierbei nicht sinnvoll, da für die Anpassung an eine langsame Frequenz, bereits aufgrund des langsameren Taktes, mehr Zeit benötigt wird als für die Anpassung an eine schnelle Frequenz. Deshalb sollte eine solche Analyse mit einem Parameter durchgeführt werden, der zeitunabhängig ist. Hierzu wird die univariate Varianzanalyse mit der Anzahl der für die Adaptation benötigten Unterarmbewegungen (siehe *Kapitel 5.2.2*) durchgeführt.

Wie der *Tabelle 11.3* zu entnehmen ist, ergaben sich signifikante Gruppenunterschiede für die Messungen mit langsamer ($p < 0,001$) und schneller Metronomvorgabe ($p < 0,001$) sowie für die *Eigenfrequenz* nach langsamen Metronomvorgabe ($p = 0,012$). Keine signifikanten Unterschiede zwischen den Gruppen, hinsichtlich der Adaptationszeit, fanden sich bei der Anpassung an die *Eigenfrequenz* nach schneller Metronomvorgabe ($p = 0,078$). Bei den Messungen der *Eigenfrequenz* benötigten die Parkinsonpatienten im Schnitt 0,3 Sekunden mehr Zeit als die altersgematchte Kontrollgruppe und 0,8 Sekunden mehr als die junge Kontrollgruppe um ihre Bewegungen auf ein stabiles Niveau einzupendeln. Der Post-Hoc-Test (*Tabelle 5.4*) ergab einen signifikanten Unterschied zwischen Parkinsonpatienten und junger Kontrollgruppe bei den Messungen der *Eigenfrequenz* nach langsamer Metronomvorgabe ($p = 0,013$). Innerhalb der *Eigenfrequenzen* nach schneller Taktvorgabe war kein signifikanter Gruppenunterschied zu eruieren. Bei den Messungen mit schneller Metronomvorgabe benötigten die Parkinsonpatienten, mit einer durchschnittlichen Differenz von 1,8 Sekunden, signifikant länger für die Adaptation als die Probanden der altersgematchten Kontrollgruppe ($p = 0,002$). Die Adaptationszeit der Parkinsonpatienten war im Vergleich zu den Probanden der jungen Kontrollgruppe ebenfalls signifikant verlängert ($p = 0,001$), es zeigte sich eine durchschnittliche Differenz von 1,9 Sekunden. Bei den Messungen mit langsamer Taktvorgabe benötigten die Parkinsonpatienten im Mittel 2,4 Sekunden länger als die altersgematchte Kontrollgruppe und 3,5 Sekunden länger als die junge Kontrollgruppe, um ihre Bewegungen an die Taktvorgabe anzupassen. Diese Unterschiede zeigten beide ein Signifikanzniveau von $p < 0,001$ (*Tabelle 5.4*), die Parkinsonpatienten benötigten also bei langsamer Taktvorgabe signifikant länger für die Adaptation als gesunde Kontrollpersonen.

Tabelle 5.4: Post-Hoc-Test Sprung für *Adaptationszeit [ms]*

Sprung			Signifikanz
Eigen nach langsam	Parkinson	Kontrolle	,15817
		Kontr. jung	,01316
	Kontrolle	Kontr. jung	,51795
Langsam	Parkinson	Kontrolle	,00061
		Kontr. jung	,00000
	Kontrolle	Kontr. jung	,16308
Eigen nach schnell	Parkinson	Kontrolle	,90678
		Kontr. jung	,09953
	Kontrolle	Kontr. jung	,22099
Schnell	Parkinson	Kontrolle	,00229
		Kontr. jung	,00142
	Kontrolle	Kontr. jung	,97583

Zusammenfassend lässt sich sagen:

- Parkinsonpatienten benötigten signifikant mehr Zeit, um sich an die *Eigenfrequenz* nach einer langsamen Taktvorgabe anzupassen als die Probanden der jungen Kontrollgruppe. Der Unterschied zur altersgematchten Kontrollgruppe war hierbei nicht signifikant.
- Parkinsonpatienten benötigten im Vergleich zu beiden gesunden Kontrollgruppen mehr Zeit, um sich an die *Eigenfrequenz* nach schneller Frequenzvorgabe anzupassen, der Unterschied war aber nicht signifikant.
- Parkinsonpatienten zeigten bei den Messungen mit Taktvorgabe durch das Metronom signifikant verlängerte Adaptationszeiten im Vergleich zu beiden Kontrollgruppen, das heißt sowohl bei langsamer als auch bei schneller Taktvorgabe benötigten sie für die Adaptation an die vorgegebene Frequenz mehr Zeit als gesunde Kontrollpersonen.

5.2.2 Adaptation nach Anzahl der Unterarmbewegungen

Um den Einfluss der gewählten *Eigenfrequenz* auf die Dauer der Adaptationszeit abzuwenden, wurde die benötigte Anzahl von Unterarmbewegungen bis zum Zeitpunkt der Adaptation analysiert. Die Mittelwerte und Standardabweichungen des Parameters *Adaptation nach Anzahl der Unterarmbewegungen* sind in *Abbildung 5.3* und *Tabelle 5.5* dargestellt.

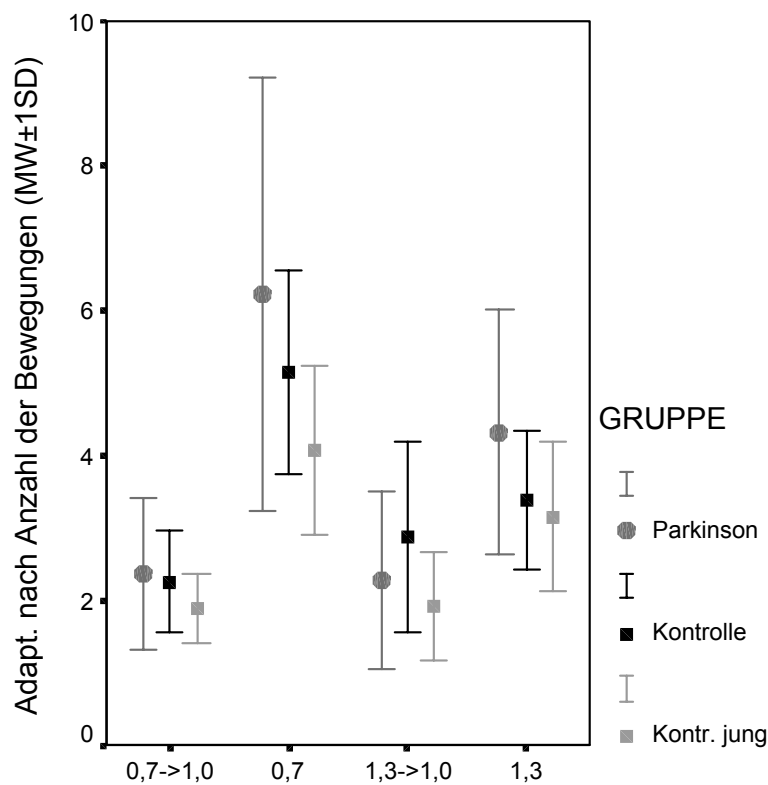


Abbildung 5.3: Mittelwerte und Standardabweichungen für *Adaptation nach Anzahl der Unterarmbewegungen*

Tabelle 5.5: Mittelwerte und Standardabweichungen für *Adaptation nach Anzahl der Unterarmbewegungen*

	Gruppe	Mittelwert	Standardabweichung
<i>Eigenfrequenz</i> nach langsamer Frequenzvorgabe	Parkinson	2,4	1,1
	Kontrolle	2,3	0,7
	Kontr. jung	1,9	0,5
langsame Frequenzvorgabe	Parkinson	6,2	3,0
	Kontrolle	5,2	1,4
	Kontr. jung	4,1	1,2
<i>Eigenfrequenz</i> nach schneller Frequenzvorgabe	Parkinson	2,3	1,2
	Kontrolle	2,9	1,3
	Kontr. jung	1,9	0,8
schnelle Frequenzvorgabe	Parkinson	4,3	1,7
	Kontrolle	3,4	1,0
	Kontr. jung	3,2	1,0

Die univariate Varianzanalyse ergab signifikante Unterschiede zwischen den Probandengruppen ($p < 0,001$) und den *Sprüngen* ($p < 0,001$). Auch hier lagen signifikante Wechselwirkungen vor ($p = 0,049$). Deshalb wurde die univariate Varianzanalyse getrennt nach den Faktoren *Gruppe* und *Sprung* vorgenommen. Die nach *Sprüngen* getrennte Varianzanalyse ergab einen signifikanten Gruppenunterschied bei Messungen mit langsamer ($p = 0,014$) und schneller Metronomvorgabe ($p = 0,026$). Die nach Gruppen getrennte Varianzanalyse ergab signifikante Unterschiede zwischen den *Sprüngen* in allen drei Gruppen ($p < 0,001$). Die einzelnen Werte sind den Tabellen 11.4, 11.5 und 11.6 im Anhang zu entnehmen.

Wie in *Abbildung 5.3* und *Tabelle 5.5* gezeigt, wurden zur *Adaptation* an die *Eigenfrequenz* von den Teilnehmern im Schnitt $2,3 \pm 0,9$ Unterarmbewegungen benötigt. Die junge Kontrollgruppe benötigte jeweils die geringste Anzahl an Bewegungen, mit der geringsten Standardabweichung. Im nach *Sprüngen* getrennten Post-Hoc-Test (*Tabelle 5.6*) zeigten sich bei den *Eigenfrequenzen* keine signifikanten Gruppenunterschiede. Bei langsamer Frequenzvorgabe benötigten die Parkinsonpatienten im Schnitt 1,1 Bewegungen mehr als die altersgematchte Kontrollgruppe und 2,1 Bewegungen mehr als die junge Kontrollgruppe. Dieser Unterschied war allerdings nur zur jungen Kontrollgruppe signifikant ($p = 0,014$). Bei schneller Taktvorgabe benötigten die Parkinsonpatienten mit einer Differenz von 1,1 Bewegungen zur jungen Kontrollgruppe signifikant mehr Bewegungen zur *Adaptation* ($p = 0,04$). Der Unterschied zur altersgematchten Kontrollgruppe war mit 0,9 Bewegungen nicht signifikant ($p = 0,11$).

Der nach Gruppen aufgeteilte Post-Hoc-Test wird in *Tabelle 5.7* wiedergegeben. Zwischen den beiden Parametern *Eigenfrequenz* nach langsamer und *Eigenfrequenz* nach schneller Taktvorgabe bestanden in keiner Probandengruppe signifikante Unterschiede hinsichtlich der benötigten Adaptationsbewegungen. Zur Anpassung an die Taktvorgabe des Metronoms wurden von allen Untersuchungsteilnehmern mehr Unterarmbewegungen benötigt als zur Anpassung an die *Eigenfrequenz*. Es fanden sich signifikante Unterschiede der benötigten Adaptationsbewegungen zwischen langsamer Frequenzvorgabe und den drei anderen Frequenzen in allen drei Probandengruppen.

Zwischen langsamer Taktvorgabe und *Eigenfrequenz* nach langsamer Taktvorgabe waren diese Unterschiede mit $p < 0,001$ in allen drei Gruppen hochsignifikant (*Tabelle 5.7*). Signifikante Unterschiede fanden sich ebenfalls zwischen langsamer Taktvorgabe und *Eigenfrequenz* nach schneller Metronomvorgabe in allen drei Probandengruppen ($p < 0,001$). Das bedeutet, dass die Untersuchungsteilnehmer für die Adaptation an die langsame Taktvorgabe signifikant mehr Unterarmbewegungen benötigten als zur Anpassung an die jeweilige *Eigenfrequenz*.

Ebenfalls für alle Gruppen war ein signifikanter Unterschied zwischen der schnellen Taktvorgabe und der *Eigenfrequenz* nach langsamer Metronomvorgabe zu finden. Dieser lag auf einem Niveau von $p = 0,036$ in der Gruppe der Parkinsonpatienten, von $p = 0,045$ in der altersgematchten Kontrollgruppe und von $p = 0,002$ in der jungen Kontrollgruppe. Beim Vergleich der schnellen Taktvorgabe und der *Eigenfrequenz* nach schneller Metronomvorgabe ergaben sich Signifikanzen in der Gruppe der Parkinsonpatienten ($p = 0,026$) und der jungen Kontrollgruppe ($p = 0,003$). Kein signifikanter Unterschied zwischen diesen Frequenzen zeigte sich in der altersgematchten Kontrollgruppe.

Des Weiteren waren für die Anpassung an die langsame Frequenzvorgabe von allen Probanden signifikant mehr Bewegungen vonnöten als für die Anpassung an die schneller Frequenzvorgabe. Die Parkinsonpatienten benötigten bei langsamer Taktvorgabe 1,9 Bewegungen mehr als bei schneller Taktvorgabe ($p = 0,043$). In der altersgematchten Kontrollgruppe betrug der Unterschied 1,8 Bewegungen ($p < 0,001$), in der jungen Kontrollgruppe 0,8 Bewegungen ($p = 0,048$).

Tabelle 5.6: Post-Hoc-Test Sprung für *Adaptation nach Anzahl der Unterarmbewegungen*

Sprung			Signifikanz
Eigen nach langsam	Parkinson	Kontrolle	,92385
		Kontr. jung	,23205
Langsam	Parkinson	Kontrolle	,41224
		Kontr. jung	,30580
	Kontrolle	Kontr. jung	,01433
Eigen nach schnell	Parkinson	Kontrolle	,32599
		Kontr. jung	,31219
	Kontrolle	Kontr. jung	,66315
Schnell	Parkinson	Kontrolle	,06173
		Kontr. jung	,11042
	Kontrolle	Kontr. jung	,04014
			,87904

Tabelle 5.7: Post-Hoc-Test Gruppe für *Adaptation nach Anzahl der Unterarmbewegungen*

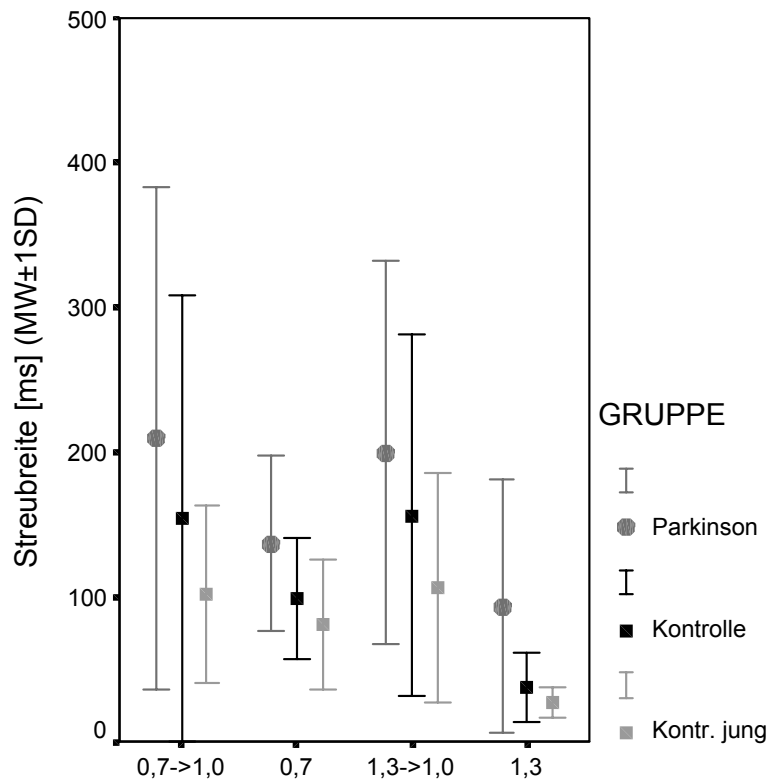
GRUPPE			Signifikanz
Parkinson	Langsam	Eigen nach langsam	,00000
		Eigen nach schnell	,00000
		Schnell	,04303
	Schnell	Eigen nach langsam	,99933
		Eigen nach schnell	,03599
		Schnell	,02582
Kontrolle	Langsam	Eigen nach langsam	,00000
		Eigen nach schnell	,00000
		Schnell	,00041
	Schnell	Eigen nach langsam	,47213
		Eigen nach schnell	,04535
		Schnell	,63122
Kontr. jung	Langsam	Eigen nach langsam	,00000
		Eigen nach schnell	,00000
		Schnell	,04846
	Schnell	Eigen nach langsam	,99974
		Eigen nach schnell	,00248
		Schnell	,00331

Zusammengefasst bedeutet dies:

- Parkinsonpatienten benötigten für die Anpassung an einen vorgegebenen Takt signifikant mehr Unterarmbewegungen als die Probanden der jungen Kontrollgruppe. Innerhalb der Messungen der *Eigenfrequenz* fand sich kein signifikanter Gruppenunterschied.
- Die Anzahl der benötigten Unterarmbewegungen zur Adaptation unterschied sich zwischen Parkinsonpatienten und altersgemachter Kontrollgruppe nicht signifikant.
- Alle drei Gruppen benötigten zur Anpassung an die langsame Taktvorgabe signifikant mehr Unterarmbewegungen als zur Anpassung an die *Eigenfrequenzen* und die schnelle Taktvorgabe.
- Alle drei Gruppen benötigten mehr Unterarmbewegungen um sich an die schnelle Taktvorgabe anzupassen, als sie für die *Eigenfrequenz* nach langsamer Taktvorgabe benötigten. Beim Vergleich schnelle Taktvorgabe und *Eigenfrequenz* nach schneller Taktvorgabe zeigte sich eine signifikant höhere Anzahl an Adaptationsbewegungen in der Gruppe der Parkinsonpatienten und der jungen Kontrollgruppe.
- Die Anzahl der benötigten Adaptationsbewegungen unterschied sich zwischen den beiden *Eigenfrequenzen* in keiner der drei Gruppen signifikant.

5.3 Streubreite in der stationären Phase

Wie schon in *Abschnitt 4.5.3 (Seite 31)* erwähnt, ermöglicht der Parameter *Streubreite* eine Aussage über die Genauigkeit mit der der Proband seine Unterarmbewegungen an den vorgegebenen Takt anpassen konnte oder seiner *Eigenfrequenz* folgen konnte.

Abbildung 5.4: Mittelwerte und Standardabweichungen für *Streubreite [ms]*Tabelle 5.8: Mittelwerte und Standardabweichungen für *Streubreite [ms]*

	Gruppe	Mittelwert [ms]	Standardabweichung
<i>Eigenfrequenz</i> nach langsamer Frequenzvorgabe	Parkinson	209,8	173,8
	Kontrolle	153,9	154,3
	Kontr. jung	102,1	61,6
langsame Frequenzvorgabe	Parkinson	136,9	60,6
	Kontrolle	98,6	42,1
	Kontr. jung	80,7	44,3
<i>Eigenfrequenz</i> nach schneller Frequenzvorgabe	Parkinson	199,4	132,4
	Kontrolle	156,3	125,5
	Kontr. jung	106,9	79,4
schnelle Frequenzvorgabe	Parkinson	93,3	87,8
	Kontrolle	37,1	24,0
	Kontr. jung	27,2	10,3

In der univariaten Varianzanalyse ergaben sich signifikante Unterschiede bezüglich der Faktoren *Gruppe* ($p < 0,001$) und *Sprung* ($p < 0,001$). Die Wechselwirkungen zwischen diesen beiden Parametern waren mit $p = 0,928$ nicht signifikant (*Tabelle 11.7*).

Abbildung 5.4 und *Tabelle 5.8* zeigen, dass die Parkinsonpatienten bei allen Messungen größere *Streubreiten* aufwiesen als die Kontrollgruppen. Der Gruppenvergleich im Post-Hoc-Test (siehe *Tabelle 5.9*) zeigte einen signifikanten Unterschied zwischen Parkinsonpatienten und altersgemachter Kontrollgruppe ($p = 0,017$) und zwischen Parkinsonpatienten und junger Kontrollgruppe ($p < 0,001$). Innerhalb der Kontrollgruppen wies die altersgemachte Kontrollgruppe bei allen Messungen eine größere *Streubreite* auf als die junge Kontrollgruppe. Dieser Unterschied war allerdings nicht signifikant ($p = 0,17$).

Der Vergleich der einzelnen Messungen zeigte, dass die *Streubreite* im Mittel bei den Messungen der *Eigenfrequenz* am höchsten war. Gefolgt wurden diese von den Messungen bei langsamer Taktvorgabe, bei denen die Probanden eine geringere *Streubreite* erzielten. Den Messungen mit schneller Taktvorgabe folgten sie Probanden noch genauer, sie wiesen hier die geringste *Streubreite* auf.

Der Post-Hoc-Test ergab, wie in *Tabelle 5.10* ersichtlich, dass diese Unterschiede nur zwischen den Messungen mit schneller Metronomvorgabe und den Messungen der *Eigenfrequenz* signifikant waren. Hier zeigte sich eine signifikant geringere Streubreite bei schneller Taktvorgabe im Vergleich zur *Eigenfrequenz* nach schneller Taktvorgabe ($p < 0,001$). Der Unterschied zur *Eigenfrequenz* nach langsamer Taktvorgabe war mit $p < 0,001$ ebenfalls signifikant. Der Vergleich der anderen *Sprünge*, also langsame gegen schnelle Taktvorgabe, *Eigenfrequenz* gegen langsame Taktvorgabe und die beiden *Eigenfrequenzen* gegeneinander, wies keine signifikanten Unterschiede bezüglich der *Streubreite* auf.

Tabelle 5.9: Post-Hoc-Test Gruppe für *Streubreite [ms]*

		Signifikanz
Parkinson	Kontrolle	,01705
	Kontr. jung	,00003
Kontrolle	Kontr. jung	,16965

Tabelle 5.10: Post-Hoc-Test Sprung für *Streubreite [ms]*

		Signifikanz
Langsam	Eigen nach langsam	,08791
	Eigen nach schnell	,10026
	Schnell	,06625
Eigen nach schnell	Eigen nach langsam	,99994
Schnell	Eigen nach langsam	,00001
	Eigen nach schnell	,00001

Zusammenfassend lässt sich sagen:

- Alle Probanden wiesen beim Generieren der *Eigenfrequenz* eine signifikant größere *Streubreite* auf, als bei den Messungen mit schneller Metronomvorgabe. Die Metronomvorgabe verbesserte also die Genauigkeit und Regelmäßigkeit der Unterarmbewegungen.
- Die Parkinsonpatienten zeigten gegenüber den beiden Kontrollgruppen eine signifikant größere *Streubreite*, das bedeutet, dass sie die Unterarmbewegungen bei allen Messungen signifikant ungenauer ausführten als die Kontrollen.

5.4 Abweichung der durchschnittlichen halben Periodendauer

Wie in *Kapitel 4.5.4 (Seite 32)* beschrieben, wurde mit diesem Parameter erfasst, wie weit die durchschnittliche *halbe Periodendauer* in der stationären Phase von der vorgegebenen *halben Periodendauer* entfernt lag. Um einen Vergleich zwischen den einzelnen Messungen möglich zu machen, wurde die jeweilige Differenz in Prozent des Sollwertes ausgedrückt.

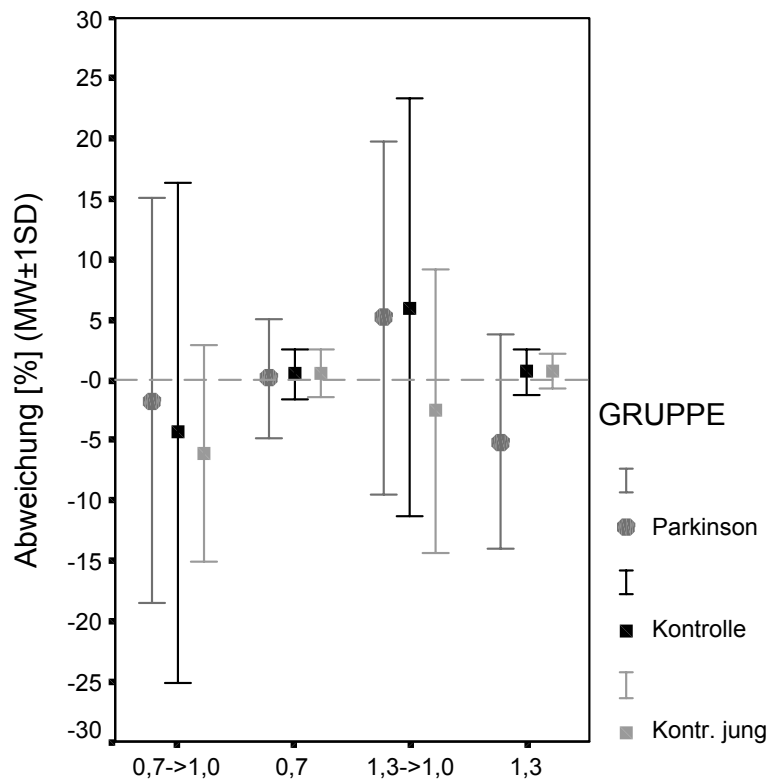


Abbildung 5.5: Mittelwerte und Standardabweichung für *Abweichung* der durchschnittlichen halben Periodendauer [%]

Tabelle 5.11: Mittelwerte und Standardabweichung für *Abweichung* der durchschnittlichen halben Periodendauer [%]

	Gruppe	Mittelwert [%]	Standardabweichung
<i>Eigenfrequenz</i> nach langsamer Frequenzvorgabe	Parkinson	-1,7	16,8
	Kontrolle	-4,4	20,7
	Kontr. jung	-6,1	9,0
langsame Frequenzvorgabe	Parkinson	0,2	5,0
	Kontrolle	0,5	2,1
	Kontr. jung	0,6	2,0
<i>Eigenfrequenz</i> nach schneller Frequenzvorgabe	Parkinson	5,1	14,6
	Kontrolle	6,0	17,4
	Kontr. jung	-2,6	11,8
schnelle Frequenzvorgabe	Parkinson	-5,2	8,9
	Kontrolle	0,7	1,9
	Kontr. jung	0,8	1,4

Die Varianzanalyse (*Tabelle 11.8* im Anhang) ergab keinen Unterschied zwischen den einzelnen *Gruppen* ($p = 0,454$), wohl aber zwischen den *Sprüngen* ($p = 0,025$). Wechselwirkungen zwischen den beiden Parametern lagen nicht vor ($p = 0,239$). Wegen der fehlenden Signifikanzen des Faktors *Gruppe* wird im Folgenden auf einen Gruppenvergleich im Post-Hoc-Test verzichtet.

Wie der *Abbildung 5.5* und der *Tabelle 5.11* zu entnehmen ist, wurden die Messungen mit Taktvorgabe von allen drei Gruppen mit einer geringeren *Abweichung* ausgeführt als die Messungen ohne Taktvorgabe. Bei langsamer Taktvorgabe fanden sich *Abweichungen* von durchschnittlich 0,2 % in der Parkinsongruppe, von 0,5 % in der altersgematchten Kontrollgruppe und von 0,6 % in der jungen Kontrollgruppe. Das heißt alle drei Gruppen wichen mit ihrer durchschnittlichen *halben Periodendauer* unter einem Prozent vom Sollwert ab. Da die Mittelwerte ein positives Vorzeichen haben, bedeutet dies, dass alle drei Gruppen den Takt im Mittel etwas zu schnell schlugen. Bei schneller Taktvorgabe waren die Unterschiede zwischen den Gruppen deutlicher ausgeprägt. Die *Abweichungen* der Kontrollen lagen wieder unter einem Prozent, 0,7 % in der altersgematchten Kontrollgruppe und 0,8 % in der jungen Kontrollgruppe, und waren positiv, das heißt analog zu den Messungen mit langsamer Taktvorgabe wurde der Takt etwas zu schnell geschlagen. Die Parkinsonpatienten zeigten bei schneller Frequenzvorgabe hingegen eine *Abweichung* von -5,2 %. Das bedeutet, dass der Takt in der stationären Phase mehr als 5 % zu langsam geschlagen wurde, die *halbe Periodendauer* deshalb zu lang war. Außerdem war die Standardabweichung um den Faktor fünf größer als bei den beiden Kontrollgruppen.

Die Analyse der *Eigenfrequenzen* ergab in allen Gruppen eine höhere *Abweichung* vom Sollwert als bei den Messungen mit Taktvorgabe. Alle drei Gruppen schlugen die mittlere Frequenz nach einer langsamen Taktvorgabe zu langsam. Hierbei zeigte die altersgematchte Kontrollgruppe mit -4,4 % und die junge Kontrollgruppe mit -6,1 % im Mittel höhere *Abweichungen* vom Soll als die Parkinsonpatienten mit -1,7 %. Nach einer schnellen Frequenzvorgabe schlugen die Parkinsonpatienten und die Kontrollgruppe den Takt zu schnell, die Parkinsonpatienten zeigten eine *Abweichung* von 5,1 %, die altersgematchte Kontrollgruppe eine *Abweichung* von 6,0 %. Die junge Kontrollgruppe generierte hingegen eine im Schnitt zu langsame Frequenz, die mit einer *Abweichung* von -2,6 % einhergeht. Das Verhältnis zwischen der *Abweichung* nach einer langsamen und *Abweichung* nach einer schnellen Taktvorgabe blieb allerdings bestehen, das heißt die generierten *Eigenfrequenzen* waren, innerhalb einer Gruppe, nach einer schnellen Taktvorgabe stets höher als nach einer langsamen Taktvorgabe.

Der Post-Hoc-Test ergab einen signifikanten Unterschied zwischen der *Eigenfrequenz*, die nach einer langsamen Frequenzvorgabe geschlagen wurde und der *Eigenfrequenz*, die nach einer schnellen Frequenzvorgabe generiert wurde ($p = 0,029$). Zwischen den anderen *Sprüngen* fand sich kein signifikanter Unterschied hinsichtlich der *Abweichung* von der Sollperiodendauer (Tabelle 5.12).

Tabelle 5.12: Post-Hoc-Test Sprung für *Abweichung* der durchschnittlichen halben Periodendauer [%]

		Signifikanz
Langsam	Eigen nach langsam	,30007
	Eigen nach schnell	,73968
	Schnell	,91230
Eigen nach schnell	Eigen nach langsam	,02854
Schnell	Eigen nach langsam	,70012
	Eigen nach schnell	,33467

Wie oben beschrieben, zeigte die Parkinsongruppe bei schneller Taktvorgabe eine deutlich größere *Abweichung* vom Soll als die beiden Kontrollgruppen. Wie in Tabelle 11.8 im Anhang zu sehen, lieferte die univariate Varianzanalyse für den Gruppenvergleich keine signifikanten Unterschiede. Dieser Gruppenvergleich wird allerdings mit der über den *Sprüngen* gemittelten *Abweichung* vorgenommen, das bedeutet es wird untersucht ob generell ein Gruppenunterschied vorliegt. Das Betrachten der Mittelwerte des Parameters (Tabelle 5.11) lässt allerdings für die Messungen mit Taktvorgabe einen Gruppenunterschied vermuten, welcher gemittelt mit den *Eigenfrequenzen* allerdings nicht signifikant war. Um den Sachverhalt trotzdem genauer untersuchen zu können, sind in Tabelle 5.13 die Anzahl der Probanden der drei Gruppen ausgezählt, die eine *Abweichung* von mehr als 5 % vom Sollwert erreichten.

Tabelle 5.13: *Abweichung* > 5% in den einzelnen Probandengruppen

		Anzahl der Probanden in der jeweiligen Gruppe		
		Parkinson-patienten	altersgematchte Kontrollgruppe	junge Kontrollgruppe
langsame Taktvorgabe	> 5% zu langsam	3	0	0
	> 5% zu schnell	4	1	1
schnelle Taktvorgabe	> 5% zu langsam	7	0	0
	> 5% zu schnell	1	1	1

Es zeigte sich ein zu langsames Taktschlagen, das heißt eine *Abweichung* von mehr als 5 %, während der schnellen Frequenzvorgabe von sieben Probanden der Parkinsongruppe. Im Gegensatz dazu generierte kein Proband der Kontrollgruppen einen Takt, der in diesem Maße vom Sollwert abwich. Ein zu schnelles Taktschlagen bei schneller Frequenzvorgabe trat bei jeweils einem Probanden in jeder der drei Gruppen auf. Einen um mehr als 5 % zu langsamen Takt bei langsamer Taktvorgabe generierten drei der Parkinsonpatienten und keine der Kontrollpersonen. Zu schnell schlugen die langsame Taktvorgabe hingegen vier Parkinsonpatienten und jeweils eine altersgematchte und eine junge Kontrollperson. Die genauen, nach Probanden aufgeschlüsselten, *Abweichungen* können den *Tabellen 11.13, 11.14 und 11.15* im Anhang entnommen werden.

Zusammengefasst bedeutet dies:

- Parkinsonpatienten haben Schwierigkeiten einer schnellen Frequenzvorgabe zu folgen. Sie schlugen hierbei einen im Mittel 5,2 % zu langsamen Takt.
- Die *Abweichung* bei schneller Metronomvorgabe war im Gruppenvergleich nicht signifikant. Dies liegt in der statistischen Auswertung begründet: der Gruppenvergleich wird mit den über den vier *Sprüngen* gemittelten *Abweichungen* der halben Periodendauer durchgeführt.
- Parkinsonpatienten zeigten deutlich häufiger eine *Abweichung* von mehr als 5 % vom vorgegebenen Takt. Drei Parkinsonpatienten generierten die langsame Taktvorgabe zu langsam, vier Patienten schlugen diesen Takt um mehr als 5 % zu schnell.
- Bei schneller Metronomvorgabe zeigten sieben Parkinsonpatienten ein zu langsames Taktschlagen, das heißt sie generierten in der stationären Phase eine Frequenz die um mehr als 5 % vom Sollwert abwich.
- Alle Probanden wurden beim Generieren der *Eigenfrequenz* von der vorangegangenen Metronomvorgabe beeinflusst. Sie schlugen nach langsamer Taktvorgabe eine signifikant langsamere *Eigenfrequenz* als nach schneller Taktvorgabe.

5.5 Standardabweichung der halben Periodendauer

Die *Standardabweichung* der halben Periodendauer innerhalb jeder Messung gibt die Präzision wieder mit der der Takt geschlagen wurde. Sie ist demnach ein Maß für die Regelmäßigkeit mit der die Unterarmbewegungen ausgeführt wurden. Eine hohe *Standardabweichung* spricht für einen hohen zufälligen Fehler bei der Terminierung der Bewegungen.

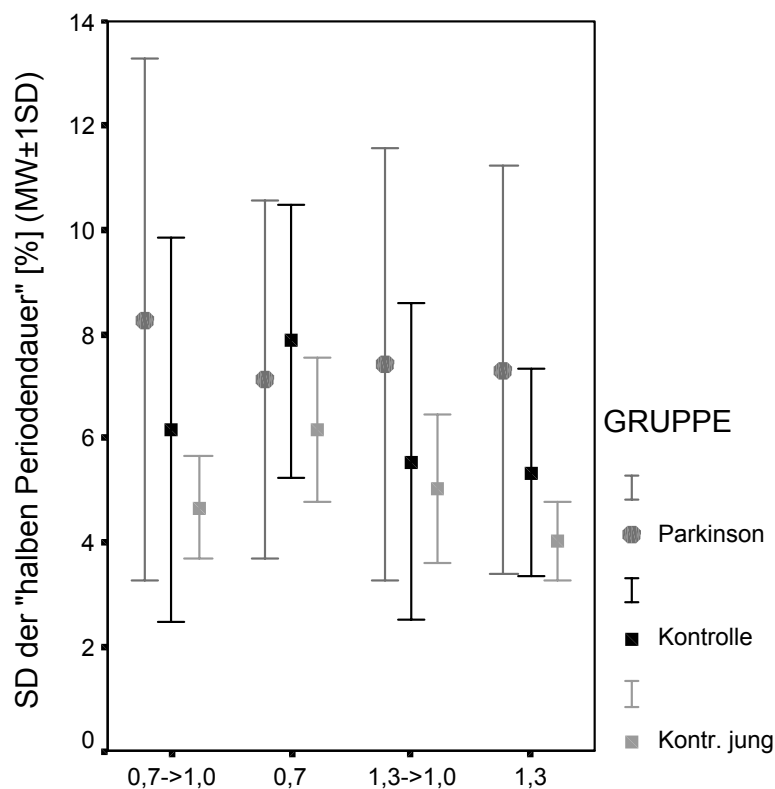


Abbildung 5.6: Mittelwerte und Standardabweichungen für *Standardabweichung* der halben Periodendauer [%]

Tabelle 5.14: Mittelwerte und Standardabweichungen für *Standardabweichung* der halben Periodendauer [%]

	Gruppe	Mittelwert [%]	Standardabweichung
<i>Eigenfrequenz</i> nach langsamer Frequenzvorgabe	Parkinson	8,3	5,0
	Kontrolle	6,2	3,7
	Kontr. jung	4,7	1,0
langsame Frequenzvorgabe	Parkinson	7,1	3,4
	Kontrolle	7,9	2,6
	Kontr. jung	6,2	1,4
<i>Eigenfrequenz</i> nach schneller Frequenzvorgabe	Parkinson	7,4	4,1
	Kontrolle	5,5	3,0
	Kontr. jung	5,0	1,4
schnelle Frequenzvorgabe	Parkinson	7,3	3,9
	Kontrolle	5,3	2,0
	Kontr. jung	4,0	0,8

Das Betrachten der Mittelwerte und der zugehörigen Standardabweichungen in *Abbildung 5.6* und *Tabelle 5.14* macht deutlich, dass die Unterschiede in der Präzision zwischen den einzelnen *Sprüngen* nur wenig ausgeprägt waren. Die univariate Varianzanalyse (*Tabelle 11.9*) ergab keine signifikanten Unterschiede zwischen den *Sprüngen* ($p = 0,093$), wohl aber zwischen den Gruppen ($p < 0,001$). Wechselwirkungen zwischen den beiden Parametern lagen nicht vor ($p = 0,384$).

Die *Eigenfrequenzen* sowie die schnelle Frequenzvorgabe sind durch die folgende Gruppenreihenfolge gekennzeichnet: die Parkinsonpatienten wiesen die höchste *Standardabweichung* auf, gefolgt von den Probanden der altersgematchten Kontrollgruppe, die geringste *Standardabweichung* wiesen die Probanden der jungen Kontrollgruppe auf. Die Messungen der langsamen Frequenzvorgabe zeigten eine Gruppenumkehr. Hier war die höchste *Standardabweichung* in der altersgematchten Kontrollgruppe zu finden, gefolgt von den Parkinsonpatienten, die höchste Präzision zeigte wiederum die junge Kontrollgruppe.

Der Vergleich der Gruppen im Post-Hoc-Test (siehe *Tabelle 5.15*) ergab einen signifikanten Unterschied der *Standardabweichung* der halben Periodendauer zwischen Parkinsonpatienten und Kontrollgruppe ($p = 0,046$) und zwischen Parkinsonpatienten und junger Kontrollgruppe ($p < 0,001$). Das bedeutet, dass die Parkinsonpatienten eine signifikant höhere *Standardabweichung*

chung, also eine signifikant niedrige Präzision, aufwiesen als die Probanden der beiden Kontrollgruppen.

Tabelle 5.15: Post-Hoc-Test Gruppe für *Standardabweichung* der halben Periodendauer [%]

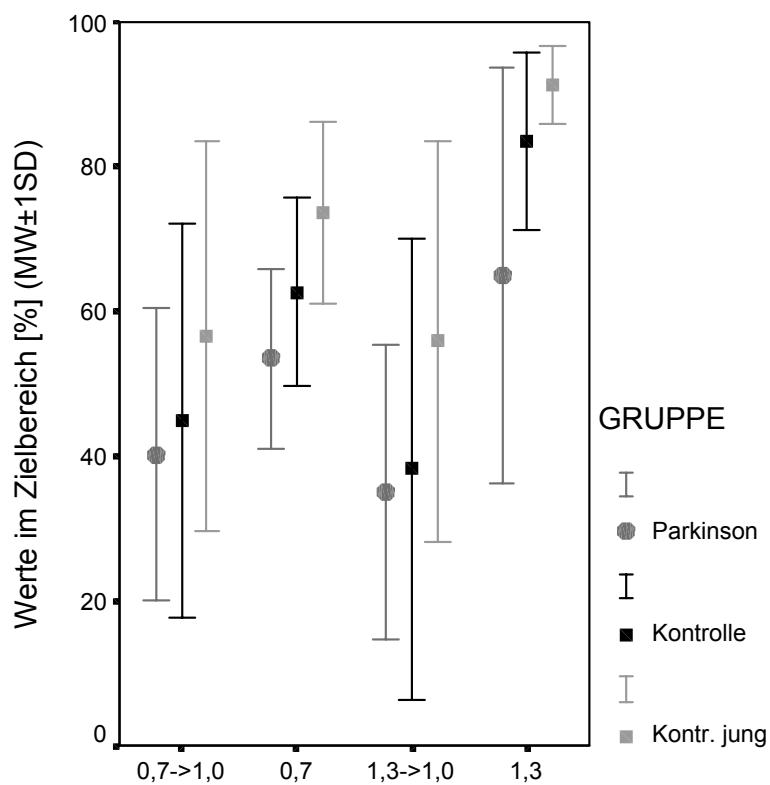
		Signifikanz
Parkinson	Kontrolle	,04636
	Kontr. jung	,00002
Kontrolle	Kontr. jung	,06236

Zusammenfassend lässt sich feststellen:

- Hinsichtlich der Präzision der Unterarmbewegungen ergab sich zwischen den *Sprün- gen* kein signifikanter Unterschied.
- Parkinsonpatienten wiesen sowohl beim Generieren einer frei wählbaren Frequenz als auch beim Folgen einer akustisch vorgegebenen Frequenz eine höhere *Standardab- weichung* der halben Periodendauer auf als die beiden Kontrollgruppen.
- Das bedeutet, dass Parkinsonpatienten beim Ausführen der repetitiven Unterarmbe- wegungen eine geringere Präzision, also eine geringere Regelmäßigkeit der Bewegun- gen, aufwiesen als gesunde Kontrollpersonen.

5.6 Werte im Zielbereich

Wie schon in *Kapitel 4.5.6 (Seite 34)* beschrieben, stellt der Parameter *Werte im Zielbereich* den Anteil der *halben Periodendauern* pro Messung dar, der sich in einem Intervall von $\pm 10 \%$ vom Soll befindet.

Abbildung 5.7: Mittelwerte und Standardabweichung für *Werte im Zielbereich [%]*Tabelle 5.16: Mittelwerte und Standardabweichung für *Werte im Zielbereich [%]*

	Gruppe	Mittelwert [%]	Standardabweichung
<i>Eigenfrequenz nach langsamer Frequenzvorgabe</i>	Parkinson	40,2	20,3
	Kontrolle	44,9	27,3
	Kontr. jung	56,6	27,1
langsame Frequenzvorgabe	Parkinson	53,5	12,4
	Kontrolle	62,7	13,0
	Kontr. jung	73,6	12,5
<i>Eigenfrequenz nach schneller Frequenzvorgabe</i>	Parkinson	35,0	20,3
	Kontrolle	38,2	31,9
	Kontr. jung	55,9	27,6
schnelle Frequenzvorgabe	Parkinson	65,0	28,6
	Kontrolle	83,6	12,3
	Kontr. jung	91,4	5,4

Die univariate Varianzanalyse lieferte, wie in *Tabelle 11.10* dargestellt, signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen ($p < 0,001$) und den *Sprüngen* ($p < 0,001$). Wechselwirkungen konnten nicht gefunden werden ($p = 0,807$).

Sowohl bei den Messungen mit Taktvorgabe als auch bei den Messungen der *Eigenfrequenz* fanden sich in der Gruppe der Parkinsonpatienten am wenigsten Werte im Zielbereich. Sie lagen zwischen 35 % und 65 %. Die Kontrollgruppe erzielte 38 % bis 84 %, die junge Kontrollgruppe sogar 56 % bis 91 % der Werte im untersuchten Bereich. Die genauen Mittelwerte und Standardabweichungen sind der *Tabelle 5.16* zu entnehmen. Der Post-Hoc-Test (siehe *Tabelle 5.17*) zeigte einen signifikanten Unterschied zwischen Parkinsonpatienten und junger Kontrollgruppe ($p < 0,001$) sowie zwischen Kontrollgruppe und junger Kontrollgruppe ($p = 0,007$). Das Signifikanzniveau zwischen Parkinsonpatienten und altersgemachter Kontrollgruppe lag bei 0,057.

Den höchsten Anteil der Werte im Zielbereich fand sich bei den Messungen mit schneller Frequenzvorgabe. Hier lagen in der Gruppe der Parkinsonpatienten 65 % der Werte im Zielbereich; die altersgemachte Kontrollgruppe erzielte 84 % und die junge Kontrollgruppe 91 % der Werte im Zielbereich. Diesen folgten die Messungen mit langsamer Frequenzvorgabe, bei denen 54 % der Werte der Parkinsonpatienten, 63 % der Werte der altersgemachten Kontrollgruppe und 74 % der Werte der jungen Kontrollgruppe im Zielbereich lagen. Bei den Messungen der *Eigenfrequenzen* fanden sich zwischen 35 % und 56 % im erwünschten Bereich. Der Post-Hoc-Test (siehe *Tabelle 5.18*) lieferte signifikante Unterschiede zwischen der langsamen Frequenzvorgabe und der *Eigenfrequenz* nach langsamer Taktvorgabe ($p = 0,004$) sowie der langsamen Frequenzvorgabe und der *Eigenfrequenz* nach schneller Taktvorgabe ($p < 0,001$). Die beiden *Eigenfrequenzen* wiesen hinsichtlich der Werte im Zielbereich signifikante Unterschiede zur schnellen Frequenzvorgabe auf, wobei das Signifikanzniveau in beiden Fällen $p < 0,001$ betrug. Außerdem war der Vergleich langsame gegen schnelle Taktvorgabe signifikant ($p = 0,002$). Keinen signifikanten Unterschied hinsichtlich der Werte im Zielbereich gab es zwischen der *Eigenfrequenz* nach schneller und der *Eigenfrequenz* nach langsamer Taktvorgabe.

Tabelle 5.17: Post-Hoc-Test Gruppe für *Werte im Zielbereich [%]*

		Signifikanz
Parkinson	Kontrolle	,05731
	Kontr. jung	,00000
Kontrolle	Kontr. jung	,00675

Tabelle 5.18: Post-Hoc-Test Sprung für *Werte im Zielbereich [%]*

		Signifikanz
Langsam	Eigen nach langsam	,00393
	Eigen nach schnell	,00011
	Schnell	,00231
Eigen nach schnell	Eigen nach langsam	,80560
Schnell	Eigen nach langsam	,00000
	Eigen nach schnell	,00000

Zusammengefasst stellt sich der Sachverhalt wie folgt dar:

- Beim Generieren der *Eigenfrequenz* erlangten die Untersuchungsteilnehmer den geringsten Anteil der Werte im Zielbereich.
- Im Vergleich zu den Messungen der *Eigenfrequenz* lagen bei den Messungen mit langsamer Metronomvorgabe signifikant mehr Werte im Zielbereich.
- Bei den Messungen mit schneller Metronomvorgabe lagen, im Vergleich zu den Messungen mit langsamer Metronomvorgabe, noch einmal signifikant mehr Werte im Zielbereich. Das heißt allen Probanden gelang es am besten der schnellen Metronomvorgabe zu folgen.
- Parkinsonpatienten wiesen in allen Messungen signifikant weniger Werte im Zielbereich auf als die Probanden der jungen Kontrollgruppe.

5.7 Abweichung der Amplituden

Hier wurden die tatsächlich erreichten Umkehrpunkte der Unterarmbewegung mit den vorgegebenen Umkehrpunkten auf dem Potentiometertisch verglichen. Es ergab sich eine *Abweichung* in Winkelgraden [°]. Diese wurden getrennt für Streck- und Beugebewegung analysiert.

5.7.1 Amplitudenabweichung bei Beugebewegung

Der Umkehrpunkt dieser Bewegung befand sich idealer Weise in 0° Position, zur Veranschaulichung sei auf *Abbildung 4.1 (Seite 19)* verwiesen. Die genauen Mittelwerte und Standardabweichungen des Parameters *Amplitudenabweichung bei Beugebewegung* können der *Abbildung 5.8* und der *Tabelle 5.19* entnommen werden.

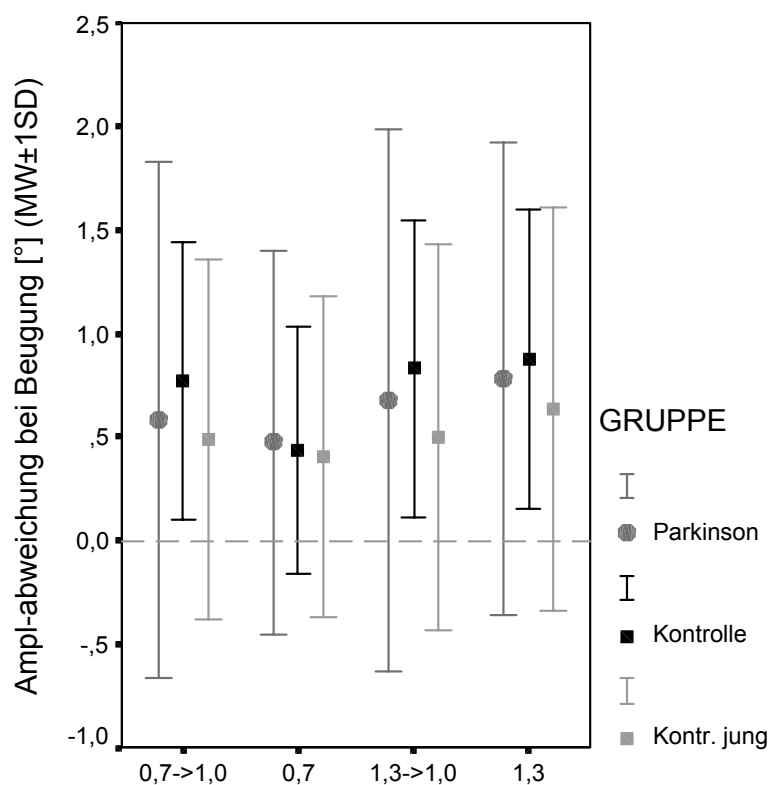


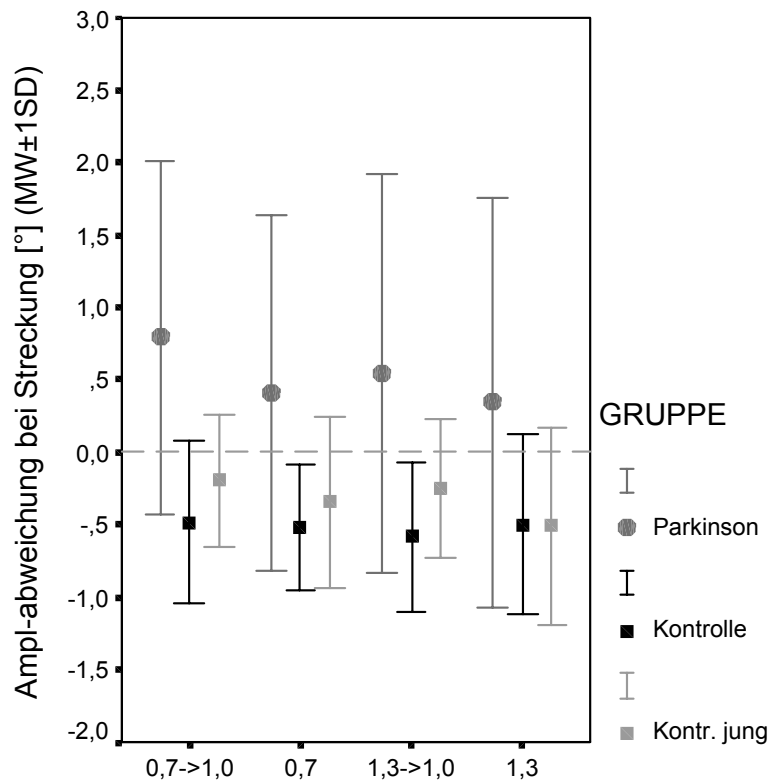
Abbildung 5.8: Mittelwerte und Standardabweichungen für *Amplitudenabweichung bei Beugebewegung* [°]

Tabelle 5.19: Mittelwerte und Standardabweichungen für *Amplitudenabweichung bei Beugebewegung* [°]

	Gruppe	Mittelwert[°]	Standardabweichung
<i>Eigenfrequenz</i> nach langsamer Frequenzvorgabe	Parkinson	0,6	1,2
	Kontrolle	0,8	0,7
	Kontr. jung	0,5	0,9
langsame Frequenzvorgabe	Parkinson	0,5	0,9
	Kontrolle	0,4	0,6
	Kontr. jung	0,4	0,8
<i>Eigenfrequenz</i> nach schneller Frequenzvorgabe	Parkinson	0,7	1,3
	Kontrolle	0,8	0,7
	Kontr. jung	0,5	0,9
schnelle Frequenzvorgabe	Parkinson	0,8	1,1
	Kontrolle	0,9	0,7
	Kontr. jung	0,6	1,0

Die Abweichungen beim 0° Umkehrpunkt lagen zwischen +0,4° und +0,9° (im Mittel 0,62° ± 0,16°). Das heißt der tatsächliche Umkehrpunkt lag im Durchschnitt außerhalb des vorgegebenen Bewegungswinkels. Anders gesagt, kehrten die Probanden ihre Bewegung im Schnitt 0,62° nach Erreichen des markierten Umlenkpunktes um. Die junge Kontrollgruppe hielt den Winkel am exaktesten ein, die altersgematchte Kontrollgruppe hingegen war im Mittel am weitesten vom markierten Umlenkpunkt entfernt. Die Varianzanalyse der *Amplitudenabweichung bei Beugebewegung*, wie in *Tabelle 11.11* dargestellt, ergab keinen signifikanten Unterschied, weder zwischen den einzelnen Gruppen ($p=0,393$), noch zwischen den einzelnen *Sprüngen* ($p=0,358$). Deshalb wird auf die anschließenden Mehrfachvergleiche im Post-Hoc-Test verzichtet.

5.7.2 Amplitudenabweichung bei Streckbewegung

Abbildung 5.9: Mittelwerte und Standardabweichungen für *Amplitudenabweichung bei Streckbewegung* [°]Tabelle 5.20 : Mittelwerte und Standardabweichungen für *Amplitudenabweichung bei Streckbewegung* [°]

	Gruppe	Mittelwert [°]	Standardabweichung
<i>Eigenfrequenz</i> nach langsamer Frequenzvorgabe	Parkinson	0,8	1,2
	Kontrolle	-0,5	0,6
	Kontr. jung	-0,2	0,5
langsame Frequenzvorgabe	Parkinson	0,4	1,2
	Kontrolle	-0,5	0,4
	Kontr. jung	-0,3	0,6
<i>Eigenfrequenz</i> nach schneller Frequenzvorgabe	Parkinson	0,6	1,4
	Kontrolle	-0,6	0,5
	Kontr. jung	-0,2	0,5
schnelle Frequenzvorgabe	Parkinson	0,4	1,4
	Kontrolle	-0,5	0,6
	Kontr. jung	-0,5	0,7

Wie aus *Abbildung 5.9* und *Tabelle 5.20* ersichtlich, fanden sich hinsichtlich der *Amplitudenabweichung bei Streckbewegung* deutliche Unterschiede zwischen den Parkinsonpatienten und den Kontrollgruppen, die durch die unterschiedlichen Vorzeichen der *Amplitudenabweichung* innerhalb der Gruppen zustande kamen. Die Gruppe der Parkinsonpatienten wies als einzige Gruppe bei allen vier *Sprüngen* positive Vorzeichen auf, das heißt die Bewegungsamplitude ist hier, wie bei den Beugebewegungen (siehe *Abschnitt 5.7.1*), zu lang. Bei den beiden Kontrollgruppen wiesen die Amplitudenabweichungen hingegen negative Vorzeichen auf. Das bedeutet, dass innerhalb dieser Gruppen der erreichte Umkehrpunkt im Mittel vor dem auf dem Tisch markierten Umkehrpunkt lag, die Bewegungsamplitude also zu kurz war.

Die statistische Auswertung ergab, wie in *Tabelle 11.12* dargestellt, signifikante Gruppenunterschiede ($p < 0,001$). Zwischen den einzelnen *Sprüngen* konnten keine Unterschiede gefunden werden ($p = 0,512$). Wechselwirkungen zwischen den beiden Parametern bestanden nicht ($p = 0,951$). Der Post-Hoc-Test (siehe *Tabelle 5.21*) ergab signifikante Unterschiede der Amplitudenabweichung zwischen Parkinsonpatienten und Kontrollgruppe ($p < 0,001$) beziehungsweise Parkinsonpatienten und junger Kontrollgruppe ($p < 0,001$). Die beiden Kontrollgruppen zeigten im Vergleich keinen signifikanten Unterschied ($p = 0,438$). Absolut gesehen waren die Parkinsonpatienten nicht weiter vom Umlenkpunkt entfernt als die Kontrollgruppen, der Unterschied liegt in der Position der Umkehr der Unterarmbewegung. Die Kontrollpersonen kehrten die Unterarmbewegungen im Mittel vor dem Erreichen des Umkehrpunktes um, während die Parkinsonpatienten im Mittel ihre Bewegungen erst nach Erreichen dieses Punktes umkehrten.

Tabelle 5.21: Post-Hoc-Test Gruppe für *Amplitudenabweichung bei Streckbewegung* [°]

		Signifikanz
Parkinson	Kontrolle	,00000
	Kontr. jung	,00000
Kontrolle	Kontr. jung	,43781

Zusammenfassend bedeutet dies:

- Beim Ausführen der Umkehrbewegung in Streckposition (32°) fanden sich signifikante Unterschiede zwischen den Parkinsonpatienten und den gesunden Kontrollpersonen. Die Kontrollen kehrten ihre Bewegungen bereits vor dem Erreichen des markierten Umlenkpunktes um, die Parkinsonpatienten wiesen hingegen eine im Schnitt zu lange Bewegungsamplitude auf.
- Die Analyse der Umkehrbewegungen in Beugeposition (0°) ergab keine signifikanten Gruppenunterschiede.
- Die durchschnittliche Amplitudenabweichung zwischen den einzelnen *Sprüngen* unterschied sich nicht signifikant.

5.8 Lineare Regressionsanalyse zur Untersuchung eines Lern- oder Ermüdungseffekts

Wie bereits in *Kapitel 4.6.2 (Seite 36)* beschrieben, wurden mit den Parametern *Adaptationszeit [ms]* und *Streubreite [ms]* eine lineare Regressionsanalyse durchgeführt. Sie dient dem Ziel, eine Veränderung dieser beiden Parameter im Verlauf der Messung zu untersuchen.

5.8.1 Adaptationszeit [ms]

Die *Abbildung 5.10* gibt die durchschnittliche Adaptationszeit in der Gruppe der Parkinsonpatienten wieder. Hierbei sind die Messungen nach *Sprüngen* aufgeteilt. Die sechs Fehlerbalken, die pro *Sprung* eingezeichnet sind, stellen die sechs Messungen dar, die im Verlauf der Untersuchung von jeder Frequenz erstellt wurden. Sie erfolgten hierbei in der Reihenfolge von links nach rechts, das heißt die erste Messung der jeweiligen Frequenz ist im linken Fehlerbalken, die letzte im rechten Fehlerbalken jedes *Sprunges* dargestellt. Zum besseren Verständnis sei noch

einmal auf die *Abbildung 4.3* (Seite 22) verwiesen. Die folgenden Abbildungen sind nach demselben Schema aufgebaut.

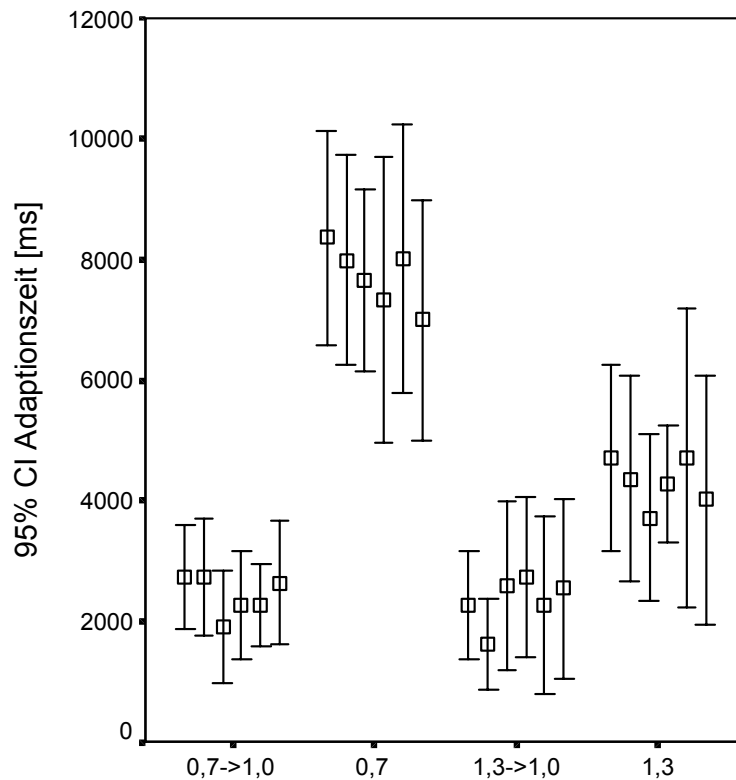


Abbildung 5.10: Regressionsanalyse für *Adaptationszeit* [ms], Parkinsonpatienten

Die gruppierten sechs Fehlerbalken stellen in der Reihenfolge von links nach rechts die nacheinander durchgeführten Messungen dar, die im Verlauf der Untersuchung von jeder der vier Untersuchungsmodalitäten erstellt wurden. Die folgenden Diagramme sind nach demselben Schema aufgebaut.

Wie in der *Tabelle 5.22* zu sehen, ergab sich in der Gruppe der Parkinsonpatienten bei keinem der *Sprünge* ein signifikanter Trend. Es konnte bezüglich der Dauer der Adaptationsphase also kein Lern- oder Ermüdungseffekt in der Parkinsongruppe gefunden werden.

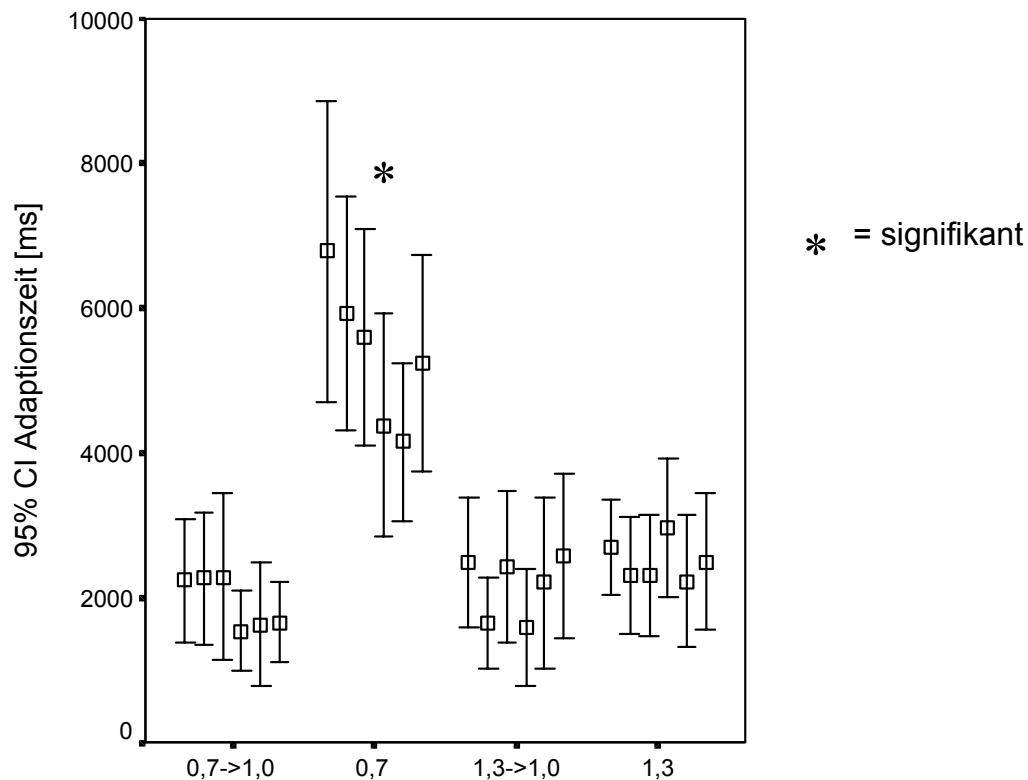


Abbildung 5.11: Regressionsanalyse für *Adaptationszeit [ms]*, Kontrollgruppe

In *Abbildung 5.11* sind die Adaptationszeiten der altersgematchten Kontrollgruppe dargestellt. Die größten Unterschiede finden sich innerhalb der Messungen mit langsamer Taktvorgabe. Die lineare Regressionsanalyse fand innerhalb dieser Messungen eine signifikante Tendenz. Er kann durch die Gerade $y = 6775 \text{ ms} - 408 \text{ ms} * x$ dargestellt werden (siehe *Tabelle 5.22*). Das bedeutet, dass sich für die Kontrollgruppe bei langsamer Frequenzvorgabe ein Lerneffekt findet, da die Dauer der Adaptationsphase zwischen den sechs Messungen im Mittel pro Messung um 408 ms abnimmt.

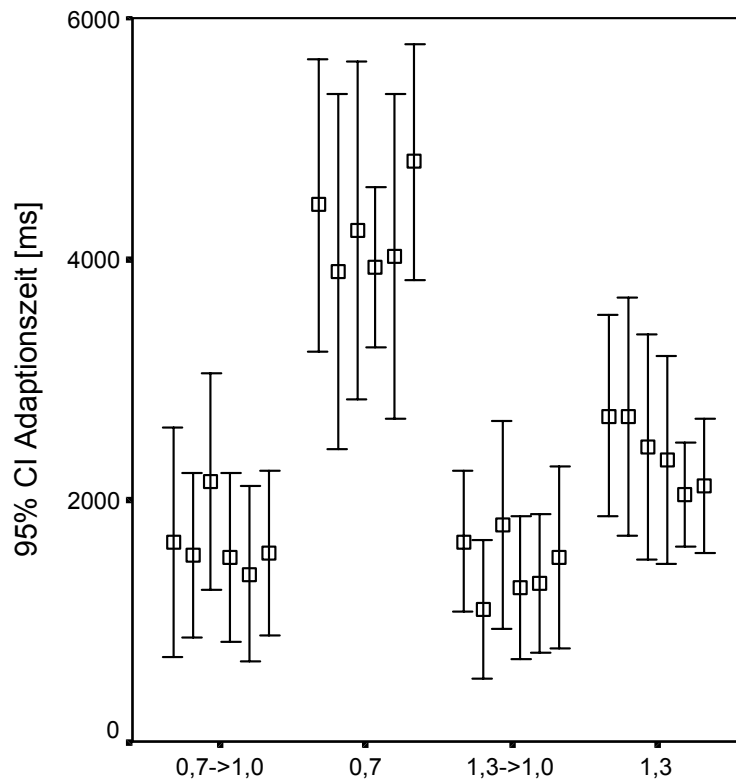


Abbildung 5.12: Regressionsanalyse für *Adaptationszeit [ms]*, Kontrollgruppe jung

Der Verlauf der *Adaptationszeit* bei schneller Taktvorgabe (1,3) lässt graphisch eine Abnahme der *Adaptationszeit* und somit einen Lerneffekt in der jungen Kontrollgruppe vermuten. Wie der *Tabelle 5.22* zu entnehmen ist, war dieser in der durchgeführten Regressionsanalyse mit $p = 0,11$ allerdings nicht signifikant.

Tabelle 5.22: lineare Regressionsanalyse für *Adaptationszeit [ms]*

Gruppe	Sprung			Signifikanz
Parkinson	Eigen nach langsam	c	2578,915	
		a	-45,041	,65672
	Langsam	c	8433,099	
		a	-202,795	,35198
	Eigen nach schnell	c	1975,426	
		a	101,884	,46992
	Schnell	c	4485,761	
		a	-54,447	,78107
Kontrolle	Eigen nach langsam	c	2490,268	
		a	-158,899	,09261
	Langsam	c	6775,381	
		a	-407,538	,02402
	Eigen nach schnell	c	2023,227	
		a	38,043	,72798
	Schnell	c	2550,226	
		a	-14,928	,87703
Kontr. jung	Eigen nach langsam	c	1793,910	
		a	-43,293	,61905
	Langsam	c	4039,430	
		a	53,311	,69229
	Eigen nach schnell	c	1496,557	
		a	-14,683	,84488
	Schnell	c	2887,197	
		a	-142,188	,10683

Das Ergebnis der Regressionsanalyse ist eine Gerade mit der Zuordnungsvorschrift $y = ax + c$, die Steigung a sowie der y-Achsenabschnitt c können der Tabelle entnommen werden.

Zusammengefasst stellt sich der Sachverhalt wie folgt dar:

- In der altersgematchten Kontrollgruppe konnte ein Lerneffekt für langsame Frequenzen gefunden werden, hier nahm die Dauer der Adaptationsphase pro Messung um 408 ms ab.
- In den beiden anderen Gruppen konnte kein statistisch signifikanter Lern- oder Ermüdungseffekt für den Parameter *Adaptationszeit [ms]* nachgewiesen werden.

5.8.2 Streubreite

Die Abbildungen des Parameters *Streubreite* sind ebenso wie die Abbildungen in *Abschnitt 5.8.1* aufgebaut. Es soll untersucht werden, ob sich für den Parameter *Streubreite* Lern- oder Ermüdungseffekte finden lassen.

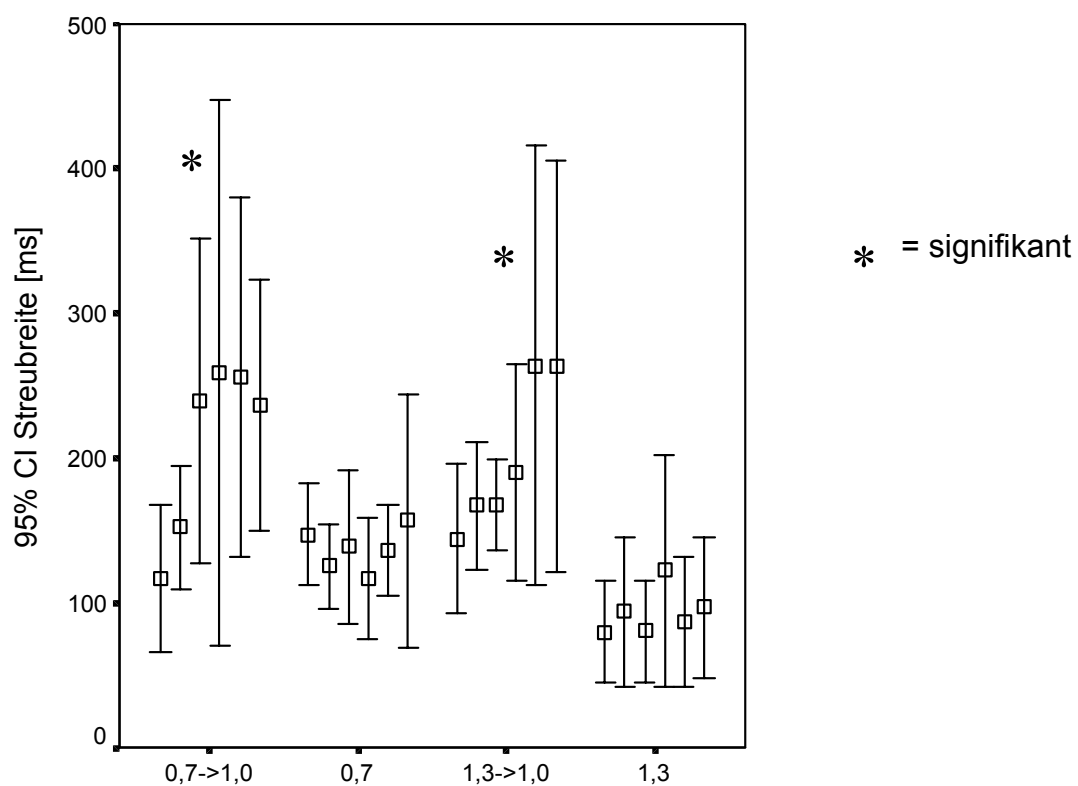


Abbildung 5.13: Regressionsanalyse für *Streubreite [ms]*, Parkinsonpatienten

In der Gruppe der Parkinsonpatienten konnte im Verlauf der Messungen der *Eigenfrequenzen* eine signifikante Zunahme der *Streubreite* verzeichnet werden. Diese Werte können der *Tabelle 5.23* entnommen werden und sind in *Abbildung 5.13* dargestellt. Bei den *Eigenfrequenzen* nach langsamer Frequenzvorgabe (0,7 -> 1,0) erhielt man eine Gerade nach $y = 117 \text{ ms} + 27 \text{ ms} \cdot x$ ($p = 0,036$). Bei den *Eigenfrequenzen* nach schneller Frequenzvorgabe (1,3 -> 1,0) ergab sich eine Gerade mit $y = 109 \text{ ms} + 26 \text{ ms} \cdot x$ ($p = 0,016$).

Wie der *Abbildung 5.14* und der *Tabelle 5.23* zu entnehmen ist, zeigte sich auch bei den Probanden der altersgematchten Kontrollgruppe eine leichte Zunahme der *Streubreite* im Verlauf der *Eigenfrequenzen* (0,7 -> 1,0 und 1,3 -> 1,0). Diese waren in der linearen Regressionsanalyse allerdings nicht signifikant ($p = 0,129$ und $p = 0,09$).

Ähnliches galt für die Probanden der jungen Kontrollgruppe, die, wie in *Abbildung 5.15* zu sehen, hauptsächlich eine Zunahme der *Streubreite* bei den Messungen der *Eigenfrequenz* nach schneller Metronomvorgabe (1,3 -> 1,0) zu verzeichnen hatten. Auch hier wies die lineare Regressionsanalyse, die in *Tabelle 5.23* wiedergegeben ist, keine signifikanten Veränderungen nach.

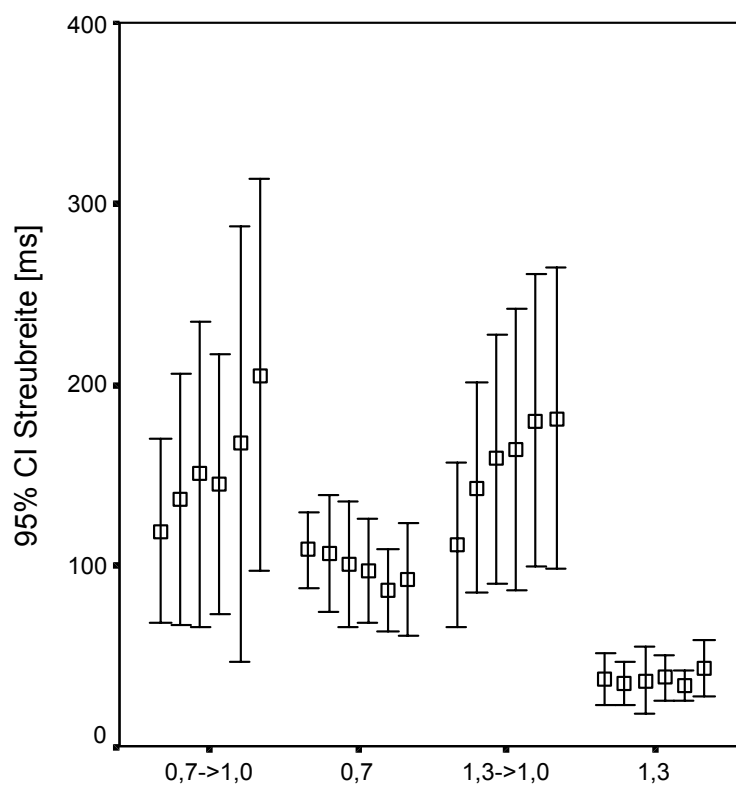


Abbildung 5.14: Regressionsanalyse für *Streubreite [ms]*, Kontrollgruppe

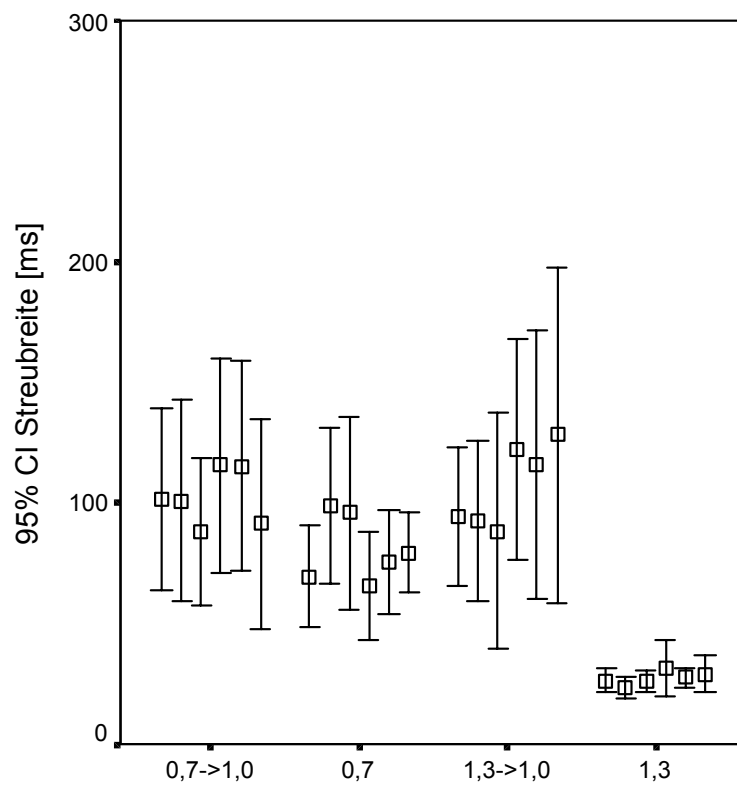


Abbildung 5.15: Regressionsanalyse für *Streubreite [ms]*, Kontrollgruppe jung

Tabelle 5.23: lineare Regressionsanalyse für *Streubreite [ms]*

Gruppe	Sprung			Signifikanz
Parkinson	Eigen nach langsam	c	116,848	
		a	26,565	,03636
	Langsam	c	130,635	
		a	1,800	,75049
	Eigen nach schnell	c	108,573	
		a	25,940	,01602
	Schnell	c	82,628	
		a	3,062	,59427
Kontrolle	Eigen nach langsam	c	102,086	
		a	14,810	,12917
	Langsam	c	112,889	
		a	-4,086	,20315
	Eigen nach schnell	c	109,757	
		a	13,304	,08970
	Schnell	c	33,926	
		a	,898	,56562
Kontr. jung	Eigen nach langsam	c	100,061	
		a	,572	,89936
	Langsam	c	85,945	
		a	-1,485	,62687
	Eigen nach schnell	c	79,783	
		a	7,754	,15361
	Schnell	c	24,003	
		a	,917	,23214

Das Ergebnis der Regressionsanalyse ist eine Gerade mit der Zuordnungsvorschrift $y = ax + c$, die Steigung a sowie der y-Achsenabschnitt c können der Tabelle entnommen werden.

Zusammenfassend lässt sich feststellen:

- In der Gruppe der Parkinsonpatienten konnte ein signifikanter Ermüdungseffekt innerhalb der Messungen der *Eigenfrequenz* verzeichnet werden. Die *Streubreite* nahm pro Messung jeweils um 26 beziehungsweise 27 ms zu. Die Genauigkeit, mit der die Frequenz der Test-Messung während der Messungen der *Eigenfrequenz* reproduziert wurde, nahm in der Parkinsongruppe im Verlauf der Messungen also ab.
- Innerhalb der beiden Kontrollgruppen konnte keine signifikante Zu- oder Abnahme der *Streubreite* im Verlauf der Messungen gefunden werden.

6 Diskussion

In diesem Kapitel werden in der methodischen Diskussion zunächst Fehlermöglichkeiten bei Messung, Datenerfassung und Auswertung erörtert. In *Abschnitt 6.1.3* wird die Aussagekraft der erfassten Parameter diskutiert. In der anschließenden Diskussion der Ergebnisse werden die einzelnen Parameter getrennt nach Adaptationsphase und stationärer Phase dargestellt. Schließlich wird erörtert, inwieweit ein Lern- oder Ermüdungseffekt im Verlauf der Messung beschrieben werden kann.

6.1 Methodische Diskussion

6.1.1 Fehlermöglichkeiten bei der Messung und Datenerfassung

Um Fehlermöglichkeiten bei der Probandenauswahl zu minimieren, wurden ausschließlich Parkinsonpatienten in die Studie eingeschlossen, welche ein idiopathisches Parkinsonsyndrom hatten. Durch eine vorangehende Untersuchung durch einen erfahrenen Neurologen wurde sichergestellt, dass sie dem akinetisch-rigiden Typ im Stadium 1 oder 2 nach Hoehn und Yahr zugeordnet waren. Theoretisch wäre es zwar möglich, dass sich in der Parkinsongruppe Patienten befinden, die statt an einem idiopathischen Parkinsonsyndrom an einer multisystemdegenerativen Erkrankung leiden. Da die meisten Patienten aber schon über längere Zeit in der neurologischen Universitätsklinik betreut wurden, wurde diese Fehlermöglichkeit minimiert.

Um zu verifizieren, dass die Versuchsteilnehmer den Untersuchungsablauf verstanden hatten, sollten sie vor Beginn der Messung den Untersuchungsablauf in eigenen Worten reflektieren. Dann wurden einige Probeläufe durchgeführt, da durch Unkenntnis des Untersuchungsablaufes eine Verfälschung des Ergebnisses hätte entstehen können. Um individuelle Einflussfaktoren, wie Größe, Länge des Unterarmes sowie die Hörfähigkeit zu kompensieren, wurden sowohl die Untersuchungsapparatur als auch die Lautstärke des Metronoms den Voraussetzungen des jeweiligen Probanden angepasst.

In der Testmessung, vor Beginn der Untersuchung, sollten die Probanden einen mittleren angenehmen Takt schlagen. An diesem orientierten sich die Frequenzvorgaben durch das Metronom in den darauf folgenden Messungen. Um Lerneffekte durch die zuvor durchgeführten Probeläufe zu minimieren, wurden diese mit einer festgelegten Frequenz von 0,4 Hz durchgeführt.

Zwischen den Probeläufen und der Beginn der Testmessung wurde eine Pause von mindestens fünf Minuten eingehalten, dies sollte verhindern, dass sich die Probanden beim Darbieten der Testmessung an der Geschwindigkeit der Armbewegungen der Probeläufe orientierten. Da Parkinsonpatienten im Sinne eine Bradykinese motorisch beeinträchtigt sind, führen sie repetitive Bewegungen langsamer aus als gesunde Kontrollpersonen. Deshalb wurde in Vorversuchen untersucht wie lange die Dauer einer einzelnen Messung sein muss, um eine Adaptation innerhalb dieser Zeit sicherzustellen. Hierbei wurde eine Zeitdauer von 24 Sekunden ermittelt, da diese Zeit ausreichte, um auch bei langsamer Durchführung der repetitiven Armbewegungen, eine Einteilung in Adaptationsphase und stationäre Phase vorzunehmen.

Eine weitere Fehlermöglichkeit bei der Durchführung der Messung ist die mangelnde Kooperation des jeweiligen Probanden. Dies könnte zu einer verzögerten Anpassung an einen vorgegebenen Takt führen. Um die Kooperativität des Probanden sicher zu stellen, wurde der Untersuchungsablauf vom Untersucher visuell kontrolliert. Da es sich bei der Kooperation des jeweiligen Probanden um keine objektiv erfassbare Größe handelt, wurde dem jeweiligen Probanden die Wichtigkeit der Kooperation erläutert. Patienten die auf den Untersucher vor oder während der Untersuchung den Eindruck machten, dass sie nur schlecht mitarbeiten konnten, wurden von der Studie ausgeschlossen.

6.1.2 Fehlermöglichkeiten bei der Auswertung

Die in *Kapitel 5* dargestellten Ergebnisse beruhen auf der Einteilung der Messungen in Adaptationsphase und stationäre Phase. Diese Einteilung wurde visuell durch zwei unabhängige Untersucher vorgenommen. Wenn die Trennung der beiden Phasen hingegen durch einen fixen Adaptationszeitpunkt festgelegt wird, kann dies zu falsch positiven Signifikanzen führen. Ein solches Vorgehen ist in *Abschnitt 4.5.2.2 (Seite 29)* beschrieben. Die bei dieser Art von Auswertung entstehenden falsch positiven Signifikanzen kamen durch die verlängerten Adaptationszeiten der Parkinsonpatienten zustande. Diese führten dazu, dass signifikante Ungenauigkeiten in der stationären Phase entstehen, welche in Wirklichkeit dadurch bedingt waren, dass die Patienten zum festgelegten Zeitpunkt noch nicht an die Frequenz adaptiert waren. Da die Patienten im Vergleich zu den Kontrollpersonen eine signifikant verlängerte Adaptationszeit aufwiesen, muss die Adaptationszeit individuell festgelegt werden und kann nicht auf einen bestimmten Zeitpunkt fixiert werden. Der subjektive Einfluss der optischen Festlegung der Adaptationszeit sollte da-

durch minimiert werden, dass den beiden Untersuchern, welche die Adaptation festlegten, weder die Identität noch die Gruppenzugehörigkeit des jeweiligen Probanden bekannt war.

Wenn die Adaptationsphase allerdings nur nach ihrer Dauer beurteilt wird, entstehen trotz der individuellen Auswertung Fehler, welche das Ergebnis beeinflussen. Dies liegt darin begründet, dass die Parkinsonpatienten in der Testmessung eine signifikant langsamere Frequenz wählten als die gesunden Kontrollpersonen. Da sich auf die in der Testmessung generierte Frequenz die nachfolgenden Taktvorgaben begründen, erhielten Parkinsonpatienten signifikant langsamere Metronomvorgaben. Durch die langsamer ausgeführten Bewegungen benötigen sie automatisch mehr Zeit, um sich an die jeweilige Frequenz anzupassen. Deshalb wurde die Adaptationsphase zusätzlich durch einen zeitunabhängigen Parameter, die *Adaptation nach Anzahl der Unterarmbewegungen*, vorgenommen. Es wurde also ausgewertet wie viele Unterarmbewegungen vom jeweiligen Probanden bis zum Zeitpunkt der Adaptation ausgeführt wurden. Dieser Parameter gewährleistet demnach eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse trotz der unterschiedlichen Geschwindigkeiten der repetitiven Unterarmbewegungen.

6.1.3 Aussagekraft der erhobenen Parameter

Die Analyse des Parameters *halbe Periodendauer* in der Testmessung ergab, dass Parkinsonpatienten bei frei wählbarer mittlerer Frequenz, der *Eigenfrequenz*, einen signifikant langsameren Takt generierten als die Kontrollpersonen. Diese Verlangsamung spiegelt die motorische Beeinträchtigung durch die Bradykinese, beziehungsweise der Bradydiadochokinese, der Parkinsonpatienten wieder (Agostino 1992, Byblow 2002). Die Bradykinese stellt eines der Kardinalsymptome des M. Parkinson dar und bildet somit eine wichtige Grundlage für die Diskussion der in dieser Untersuchung erhobenen Parameter.

Im Gruppenvergleich des Parameters *Adaptationszeit [ms]* fanden sich signifikante Unterschiede hinsichtlich der Anpassung an vorgegebene Frequenzen zwischen Parkinsonpatienten und altersgemachter Kontrollgruppe. Diese Unterschiede konnten bei der Auswertung der Adaptationsphase anhand der Anzahl der hierfür benötigten Unterarmbewegungen nicht aufgezeigt werden. Deshalb muss angenommen werden, dass es sich hierbei um einen Störeffekt handelt. Dieser kommt dadurch zustande, dass Parkinsonpatienten in der Testmessung signifikant langsamere Frequenzen als die beiden Kontrollgruppen generierten. Dies hat zur Folge, dass die je-

weiligen Metronomvorgaben ebenfalls signifikant langsamer waren als die der Kontrollen. Dadurch wird bei gleicher Anzahl von Unterarmbewegungen von den Parkinsonpatienten mehr Zeit für die Adaptation benötigt. Wie in *Kapitel 6.1.2* sollte deshalb eine solche Untersuchung mit einem zeitunabhängigen Faktor durchgeführt werden. Die folgende Diskussion der Adaptationsfähigkeit wird dementsprechend anhand des Parameters *Adaptation nach Anzahl der Unterarmbewegungen* vorgenommen.

Da sich die Parameter *Streubreite*, *Abweichung* und *Standardabweichung* der durchschnittlichen halben Periodendauer als geeignete Parameter zur Erfassung der stationären Phase herausgestellt haben, sollen die jeweiligen Ergebnisse in *Kapitel 6.2.2* diskutiert werden. Die Analyse des Parameters *Werte im Zielbereich* ergab, dass Parkinsonpatienten signifikant weniger Werte im untersuchten Bereich aufwiesen als die Probanden der jungen Kontrollgruppe. Des Weiteren führten alle Untersuchungsteilnehmer die schnelle Frequenzvorgabe mit dem höchsten Anteil der Werte im Zielbereich aus, gefolgt von der langsamen Frequenzvorgabe und schließlich den *Eigenfrequenzen*. Der Parameter bietet zwar einen guten Überblick über die Fähigkeit akkurate repetitive Bewegungen auszuführen, insgesamt sind die Ergebnisse dieses Parameters aber relativ schwierig zu interpretieren. Dies liegt in den vielen Einflussfaktoren auf diesen Parameter begründet. Zum einen geht hierbei die benötigte Adaptationszeit ein, zum anderen aber auch die Genauigkeit und Richtigkeit mit der die Frequenz geschlagen wurde. Die genauen Kausalzusammenhänge lassen sich deshalb an den einzelnen Parametern *Adaptationsphase*, *Streubreite* und *Abweichung* besser erkennen.

Ein typisches Symptom des Parkinsonsyndroms ist die Hypokinese, das heißt die Bewegungen der Patienten sind in ihrer Amplitude vermindert (Byblow 2002, Konczak 1997). Außerdem findet sich eine erhöhte Variabilität der Endpunkte einer Bewegung (Sheridan 1987, 90). Anzeichen für eine Hypokinese konnten in dieser Untersuchung nicht bestätigt werden. Es zeigte sich im Gegenteil, dass Parkinsonpatienten ihre Bewegungen in Streckposition später umlenkten als die Probanden der Kontrollgruppen. Absolut gesehen war die junge Kontrollgruppe zwar genauer in der Einhaltung der Umkehrpunkte, zwischen Parkinsonpatienten und ihrer altersgematchten Kontrollgruppe zeigte sich aber kein signifikanter Unterschied. Die Variabilität der Endpunkte war in der Gruppe der Parkinsonpatienten jedoch erhöht, sie betrug durchschnittlich 1.2° , während die altersgematchte Kontrollgruppen eine Variabilität von 0.6° und die junge Kontrollgruppe eine Variabilität von 0.7° aufwiesen. Das für den M. Parkinson typische Phänomen der Hypokinese konnte in der vorliegenden Arbeit nicht bestätigt werden. Eine mögliche Erklärung hierfür

könnte sein, dass die Untersuchung in einem eher proximalen Gelenk, nämlich dem Ellenbogengelenk, durchgeführt wurde, wobei die Parkinsonsymptome typischer Weise an distalen Gelenken, wie zum Beispiel dem Handgelenk, ausgeprägter zu finden sind.

6.2 Diskussion der Ergebnisse

In diesem Teil der Diskussion sollen die Unterschiede hinsichtlich der Adaptationsphase und der stationären Phase dargestellt werden. In *Abschnitt 6.2.3* werden Lern- und Ermüdungseffekte diskutiert. Es handelt sich hierbei sowohl um Unterschiede die im gesamten Probandenkollektiv auftraten, sowie um Unterschiede zwischen Parkinsonpatienten und gesunden Kontrollpersonen.

6.2.1 Adaptationsphase

Wie im Ergebnisteil präsentiert, benötigten die Untersuchungsteilnehmer insgesamt mehr Zeit und mehr Unterarmbewegungen um sich an eine Taktvorgabe anzupassen, als dies für das Einpendeln auf eine stabile Frequenz (*Eigenfrequenz*) vonnöten war (siehe *Kapitel 5.2.2*). Des Weiteren ist zu erwähnen, dass von allen Untersuchungsteilnehmern für eine Umstellung auf eine langsame Taktvorgabe mehr Unterarmbewegungen benötigt wurden als für die Anpassung an eine schnelle Taktvorgabe. Diese Beobachtung stimmt mit der Untersuchung von Sheridan (1987) überein, in der sich zeigte, dass Probanden bei der Initiierung langsamer Bewegungen generell länger benötigten als bei der Durchführung schneller Bewegungen. Allerdings führten sie hierbei Zielbewegungen auf eine Zielscheibe durch, wohingegen in der vorliegenden Arbeit repetitive Bewegungen an ein Taktsignal angepasst wurden.

Die Auswertung des Parameters *Adaptation nach Anzahl der Unterarmbewegungen* lieferte weiterhin das Ergebnis, dass Parkinsonpatienten signifikant mehr Unterarmbewegungen benötigten um sich an eine vorgegebene Frequenz anzupassen als die Probanden der jungen Kontrollgruppe. Die Probanden der altersgematchten Kontrollgruppe benötigten weniger Unterarmbewegungen als die Parkinsonpatienten und mehr Unterarmbewegungen als die Probanden der jungen Kontrollgruppe. Es kann also von einer leichten Abnahme der Fähigkeit der Rhythmusadaptation in höherem Lebensalter ausgegangen werden, wobei die Unterschiede zwischen den drei Gruppen nicht signifikant waren. Diese Hypothese wird von der Untersuchung von Kauranen (1996)

gestützt, in der sich eine Abnahme der motorischen Fähigkeiten ab dem 50. Lebensjahr zeigte. Ebenso zeigten Nagasaki et al. (1988) ein gehäuftes Vorkommen des so genannten „hastening phenomenon“ bei älteren gesunden Probanden auf. Zur Erläuterung dieses Phänomens sei auf *Kapitel 3.4.2 (Seite 10)* verwiesen. Nutt (2000) beschrieb eine negative Korrelation des Lebensalters mit der erreichten Höchstgeschwindigkeit repetitiver Bewegungen. Es lässt sich also vermuten, dass in höherem Lebensalter die Fähigkeit zur Durchführung von Willkürbewegungen und repetitiven Bewegungen leicht abnimmt, auch wenn die älteren gesunden Probanden in dieser Fähigkeit in der vorliegenden Arbeit nicht in dem Maße eingeschränkt waren wie die Parkinsonpatienten.

Parkinsonpatienten benötigten signifikant mehr Unterarmbewegungen um sich an einen vorgegebenen Takt anzupassen wie die Probanden der jungen Kontrollgruppe. Eine Ursache für die verlängerten Adaptationsphasen der Parkinsonpatienten könnte die Verlangsamung der Reaktionszeit darstellen, wie sie in den Studien von Sheridan (1987) und Jahanshahi (1992) gefunden wurde. Gegen die verlängerten Reaktionszeiten als alleinige Ursache für die verzögerte Adaptation spricht allerdings, dass die Parkinsonpatienten für die Adaptation an die jeweilige *Eigenfrequenz* nicht mehr Bewegungen als die Kontrollgruppen benötigten. Bei der Adaptation an einen akustisch vorgegebenen Takt mussten die Probanden ihre Armbewegungen entweder beschleunigen oder abbremsen. Sie mussten hierzu das Taktsignal zunächst auditiv wahrnehmen, es dann in ein motorisches Programm umsetzen, dieses mit der Realität überprüfen und gegebenenfalls korrigieren. Die Studien von Byblow (2002) und Almeida (2003) kamen zu dem Ergebnis, dass Parkinsonpatienten Schwierigkeiten haben, ihr Bewegungsmuster zu ändern, sie benötigten hierbei signifikant mehr Zeit, um von ihrer momentan ausgeführten Bewegung auf die nächste „umszuschalten“. In der Studie von Byblow (2002) wurden die von den Probanden beidarmig ausgeführten repetitiven Pro- und Supinationsbewegungen des Unterarmes untersucht. Parkinsonpatienten zeigten, zusätzlich zur bestehenden Brady- und Hypokinese, Schwierigkeiten ihren Bewegungsablauf zu ändern. Sie sollten hierbei ihre Bewegungen von einem symmetrischen Bewegungsablauf auf einen gegenläufigen Bewegungsablauf umstellen. Auch in der Studie von Almeida (2003) benötigten Parkinsonpatienten signifikant mehr Zeit um ihr Bewegungsmuster zu ändern, der Versuchsaufbau gleicht dem von Byblow (2002), allerdings wurden hier repetitive Abduktions-Adduktionsbewegungen im Schultergelenk durchgeführt. Auch bei der Durchführung sequentieller Bewegungen führten Parkinsonpatienten die Einzelbewegungen langsamer durch als gesunde Kontrollpersonen und zeigten ein längeres Intervall zwischen diesen Bewegungen (Benecke 1987, Agostino 1992). Es lässt sich also vermuten, dass die verlängerten Adap-

tationsphasen der Parkinsonpatienten nicht nur in einer verlängerten Reaktionszeit begründet liegen, sondern durch ein Defizit in der Umsetzung einer akustischen Wahrnehmung in ein motorisches Programm verursacht werden.

6.2.2 Stationäre Phase

Nach vollzogener Frequenzadaptation sollten die Probanden dem vorgegebenen Takt möglichst genau folgen. Hierbei zeigte sich, dass alle Versuchsteilnehmer eine niedrigere *Streubreite*, also eine höhere Genauigkeit, beim Folgen der schnellen Taktvorgabe aufwiesen als dies in den Messungen ohne Taktvorgabe (*Eigenfrequenz*) der Fall war. Auch die Messungen mit langsamer Taktvorgabe erhöhten die Genauigkeit der Unterarmbewegungen der Probanden, der Unterschied zu den Messungen der *Eigenfrequenz* war allerdings nicht signifikant. In der Literatur wird die Verbesserung der Genauigkeit von Bewegungen bei externer Taktvorgabe uneinheitlich bewertet. In den Untersuchungen von Freeman (1993) und McIntosh (1997) zeigte sich eine signifikante Zunahme der Genauigkeit unter externer Taktvorgabe, während Almeida (2002) und Platz (1998) keinen Gewinn durch die Taktvorgabe finden konnten. In der vorliegenden Arbeit kann also bestätigt werden, dass sowohl Parkinsonpatienten wie auch gesunde Kontrollpersonen von der externen Taktvorgabe profitierten. Sie führten die repetitiven Bewegungen signifikant akkurater und regelmäßiger aus als die Bewegungen der mittleren Frequenz ohne Taktvorgabe. Wie oben erwähnt war dies besonders deutlich bei den Messungen mit schneller Taktvorgabe. Hier sank der Parameter *Streubreite*, welcher ein Maß für die Genauigkeit der durchgeführten Bewegungen darstellt, auf 25 bis 45 % des Wertes, welcher bei den Messungen ohne Taktvorgabe zu verzeichnen war.

Als Ursache für die Ungenauigkeit der Bewegungen bei den Messungen ohne Taktvorgabe wird angenommen, dass die Probanden im Verlauf der Untersuchung das Gefühl für die am Anfang gewählte mittlere Frequenz verloren. Hierbei ist zu bemerken, dass sie während der Untersuchung keine Rückmeldung erhielten, inwieweit sie die mittlere gewählte Frequenz reproduzieren konnten. Hierfür spricht auch, dass alle Probanden bei der Reproduktion ihrer *Eigenfrequenz* von der direkt vorangegangenen Taktvorgabe beeinflusst wurden. Sie schlugen den frei gewählten Takt nach einer langsamen Taktvorgabe signifikant langsamer als nach schneller Taktvorgabe (siehe *Tabelle 5.12, Seite 54*). Weder Parkinsonpatienten noch Kontrollen scheinen also eine so stark verinnerlichte mittlere Frequenz, oder einen so genauen internen Rhythmusgeber zu be-

sitzen, dass dieser nicht von außen beeinflusst werden könnte. Es lässt sich stattdessen vermuten, dass sich die Untersuchungsteilnehmer bei der Reproduktion dieser mittleren Frequenz an den zuvor akustisch dargebotenen Frequenzen orientierten und so die oben beschriebene Beeinflussung zustande kam. Hierbei fand sich keine Abhängigkeit zur Geschwindigkeit dieser mittleren Frequenz, diese Beeinflussung durch die vorangegangene Taktvorgabe lag also vor, egal wie schnell diese mittlere Frequenz interindividuell gewählt worden war.

Der Gruppenvergleich innerhalb der stationären Phase wurde mit den Parametern *Streubreite* (Genauigkeit), *Abweichung* (Richtigkeit, systematischer Fehler) und *Standardabweichung* der halben Periodendauern (zufälliger Fehler) vorgenommen.

Die *Streubreite*, mit der die repetitiven Unterarmbewegungen durchgeführt wurden, war in der Gruppe der Parkinsonpatienten signifikant höher als in den Kontrollgruppen. Das heißt, sie führten die Bewegungen signifikant ungenauer aus als gesunde Kontrollpersonen. Diese ungenauen Bewegungen können verschiedene Ursachen haben. Zum einen ist es möglich, dass die Bewegungen unregelmäßiger ausgeführt werden, zum anderen kann dies dadurch zustande kommen, dass eine im Durchschnitt zu langsame oder zu schnelle Frequenz generiert wurde.

Zur Klärung dieses Sachverhaltes dient die Analyse des Parameters *Abweichung*. Bei schneller Taktvorgabe zeigte sich eine *Abweichung* von -5,2 % in der Parkinsongruppe. Das bedeutet, dass die Unterarmbewegungen von den Parkinsonpatienten nicht nur ungenauer ausgeführt wurden, sondern auch ein im Durchschnitt zu langsamer Takt generiert wurde. Im Gegensatz dazu hatten die Kontrollgruppen keine Probleme der schnellen Taktvorgabe zu folgen. Da dieser erhöhte systematische Fehler nur beim Darbieten der schnellen Taktvorgabe nachzuweisen war, muss davon ausgegangen werden, dass die Parkinsonpatienten aufgrund der motorischen Beeinträchtigung, im Sinne einer Bradydiadochokinese, nicht fähig waren ihre Unterarmbewegungen akkurat zur schnellen Taktvorgabe zu synchronisieren. Es sei nochmals darauf hingewiesen, dass diese Schwierigkeiten auftraten, obwohl die schnelle Taktvorgabe in der Gruppe der Parkinsonpatienten signifikant langsamer war als die der Kontrollgruppen. Bei langsamer Taktvorgabe und den Messungen ohne Taktvorgabe wiesen die Parkinsonpatienten hingegen keine signifikant größere *Abweichung* auf als die Kontrollpersonen. Das bedeutet, dass die Schwierigkeiten einen eigenständigen Takt zu generieren nicht in der verminderten Internalisierung des Taktes begründet liegen können. Dies hätte zur Folge, dass stärker abweichende Frequenzen generiert würden. Dieser Sachverhalt kann in der vorliegenden Arbeit nicht bestätigt werden, bei den Messungen

ohne Taktvorgabe zeigten die Parkinsonpatienten sogar eine etwas geringere *Abweichung* vom Soll als die beiden Kontrollgruppen. Das bedeutet, dass sie die Armbewegungen bei den Messungen der Eigenfrequenz und der langsamen Taktvorgabe mit derselben Richtigkeit wie die Kontrollen ausführen konnten. Wie oben beschrieben zeigte der Parameter *Streubreite* aber signifikante Unterschiede zwischen Parkinsonpatienten und Kontrollpersonen, dies liegt in der erhöhten Variabilität der Armbewegungen begründet. Dies bestätigt auch die Analyse des Parameters *Standardabweichung* der halben Periodendauer. Diese ergab eine signifikant größere *Standardabweichung*, also einen größeren zufälligen Fehler, in der Gruppe der Parkinsonpatienten. Die Schwierigkeiten der Parkinsonpatienten liegen also in der Genauigkeit und Präzision der repetitiven Bewegungen, im Sinne einer Übereinstimmung sich wiederholender Messwerte, begründet. Da es sich bei den Messungen ohne Taktvorgabe um eine frei gewählte mittlere Frequenz handelte, kann hier der Faktor Geschwindigkeit, im Sinne einer Bradydiadochokinese, keine Rolle spielen. Es muss also davon ausgegangen werden, dass Parkinsonpatienten generell Schwierigkeiten haben regelmäßige repetitive Armbewegungen durchzuführen.

Diese Ergebnisse entsprechen weitgehend denen von Pastor (1992), Konczak (1997) und Freeman (1993), welche die unpräzisere Ausführung von Bewegungen und der damit verbundene höhere Variabilität von Bewegungen bei Parkinsonpatienten aufzeigten. In der Untersuchung von Pastor (1992) zeigten Parkinsonpatienten abhängig von ihrem Krankheitsstadium eine erhöhte Variabilität repetitiver Bewegungen unabhängig von der dargebotenen Frequenz. Auch in der Untersuchung von Konczak (1997) führten die Parkinsonpatienten repetitive Bewegungen mit einer erhöhten Variabilität, also einem höheren zufälligen Fehler, durch als ihre Kontrollpersonen. Das Defizit in der Durchführung der repetitiven Bewegungen trat hier, wie in der vorliegenden Arbeit, sowohl mit als auch ohne externen Taktgeber auf. In der Untersuchung von Freeman (1993) traten die Ungenauigkeiten der Bewegungen von Parkinsonpatienten ebenfalls in Messungen mit und ohne Signalvorgabe auf. Deshalb kam Freeman zu dem Schluss, dass bei Parkinsonpatienten ein Defizit des internen Zeitgebers vorliegen könnte.

In der vorliegenden Arbeit konnte gezeigt werden, dass Parkinsonpatienten nicht fähig sind Bewegungen akkurat zu einem Taktgeber zu synchronisieren. Zu diesem Ergebnis kam auch Nakamura (1978), er beschrieb das so genannte „*hastening phenomenon*“, welches durch ein signifikant zu schnelles Taktschlagen in der Parkinsongruppe gekennzeichnet ist. In der Studie von Freeman (1993) zeigte sich eine verminderte Fähigkeit zur Synchronisation eines Taktes auch bei Variation des Taktes. Die Parkinsonpatienten klopften bei langsamer Taktvorgabe (1-3

Hz) den Takt zu schnell, bei schneller Taktvorgabe (4-5 Hz) hingegen zu langsam. Logigian (1991) nahm aufgrund dieser Ergebnisse an, dass Parkinsonpatienten Schwierigkeiten haben Bewegungen zu generieren, die in ihrer Geschwindigkeit außerhalb ihres Tremorbereiches liegen. In der vorliegenden Arbeit zeigte sich ein zu langsames Taktschlagen der schnelleren Frequenz bei sieben der Parkinsonpatienten (siehe *Kapitel 5.4*), was für eine motorische Beeinträchtigung, im Sinne eine Bradydiadochokinese, sprechen würde. Allerdings fand sich ein zu schnelles Taktschlagen bei langsamer Taktvorgabe („hastening“) bei vier der Parkinsonpatienten, wohingegen nur eine altersgematchte und eine junge Kontrollperson den Takt um mehr als 5 % zu schnell schlugen. Außerdem fand sich bei drei Parkinsonpatienten ein zu langsames Taktschlagen bei langsamer Taktvorgabe. Diese Ergebnisse entsprechen somit weitgehend denen von Freeman (1993), auch wenn hier der Takt mit einem Finger geschlagen wurde und so die jeweiligen Frequenzen nicht direkt verglichen werden können.

Die Parkinsonpatienten zeigen aufgrund ihrer motorischen Beeinträchtigung durch die Bradykinese Schwierigkeiten der schnellen Taktvorgabe akkurat zu folgen. Darüber hinaus hatten sie Schwierigkeiten regelmäßige repetitive Bewegungen auszuführen. Da die Parkinsonpatienten auch die Bewegungen bei den Messungen der Eigenfrequenz signifikant ungenauer ausgeführten, ist anzunehmen, dass sie grundsätzlich Probleme haben einen eigenständigen Takt zu generieren. Dies lässt den Schluss zu, dass zusätzlich zur motorischen Beeinträchtigung ein Defizit in der internen Rhythmusbildung vorliegt. Gegen ein rein motorisches Defizit als Ursache der unregelmäßigen Bewegungen spricht außerdem, dass sich die Patienten im Stadium 1 und 2 nach Hoehn und Yahr, und somit im Anfangsstadium der Erkrankung, befanden. Sie waren also zum Zeitpunkt der Untersuchung in ihrer Motorik nur gering eingeschränkt.

Die genaue Ursache für das Defizit in der Durchführung repetitiver Bewegungen ist hingegen bislang unklar. Da repetitive Bewegungen eine Kombination aus Einzelbewegungen darstellen, lässt sich vermuten, dass neben der motorischen Beeinträchtigung der Parkinsonpatienten ein Defizit der zentralen Verarbeitung motorischer Programme vorliegt (Brown 1991, Berardelli 2001). Eine Erklärung hierfür könnte der für den M. Parkinson verantwortliche Dopaminmangel in der Substantia nigra sein, dieser führt in Endeffekt zu einer verminderten Aktivität der Neurone des supplementär motorischen Kortex und prämotorischen Kortex (Rand 2002). Da vor allem der supplementär motorische Kortex an der Organisation von sequentiellen Bewegungen beteiligt ist, könnte das Defizit der internen Rhythmusbildung im Sinne einer eingeschränkten motorischen Verarbeitungsfähigkeit gedeutet werden. Dies würde, wie in der vorliegenden Arbeit ge-

zeigt, zum einen die verlängerten Adaptationsphasen der Parkinsonpatienten erklären, zum anderen würde ein Defizit in der zentralen Verarbeitungsfähigkeit auch die Schwierigkeiten der Parkinsonpatienten in der Durchführung repetitiver Bewegungen mit und ohne Taktvorgabe begründen.

6.2.3 Lern- und Ermüdungseffekte im Verlauf der Untersuchung

Viele Untersuchungen konnten eine Verbesserung der motorischen Fähigkeiten durch Training bei Parkinsonpatienten zeigen: Platz (1998) wies nach, dass die Patienten durch Übung eine signifikante Verbesserung der Geschwindigkeit ihrer Zielbewegungen erreichten, ohne an Genauigkeit einzubüßen. Ebenso verbesserte sich die Reaktionszeit von Zielbewegungen durch Übung bei Parkinsonpatienten und Kontrollpersonen (Behrmann 2000). Parkinsonpatienten profitieren vom Training sequentieller Bewegungen, auch wenn sie diese nie so exakt ausführen konnten wie die Kontrollen (Swinen 2000, Agostino 1996). Haarrington (1990) und Krebs (2001) beschrieben jedoch eine eingeschränkte Verbesserung von motorischen Aufgaben durch Training bei Parkinsonpatienten.

In der vorliegenden Arbeit konnte kein Lerneffekt im Sinne einer schnelleren Adaptation nachgewiesen werden. Es zeigte sich zwar eine Abnahme der Adaptationszeit bei langsamer Taktvorgabe innerhalb der altersgematchten Kontrollgruppe im Mittel um 400 ms pro Messung, allerdings zeigte sich diese Verbesserung weder in der jungen Kontrollgruppe noch in der Gruppe der Parkinsonpatienten. Bei den Messungen mit schneller Taktvorgabe und den Messungen ohne Taktvorgabe ergab sich in keiner der drei Gruppen eine Abnahme der Adaptationszeit durch Training. In der Zusammenschau der Ergebnisse scheint es sich bei der statistisch signifikanten Abnahme der Adaptationszeit bei langsamer Taktvorgabe innerhalb der altersgematchten Kontrollgruppe um einen Zufall zu handeln. Das bedeutet, dass es durch Wiederholung weder zu einem Lern- noch zu einem Ermüdungseffekt hinsichtlich der Adaptation an eine Frequenzvorgabe kam.

Der Parameter *Streubreite* nahm im Laufe der Messungen ohne Taktvorgabe in der Gruppe der Parkinsonpatienten signifikant zu. Das bedeutet, dass diese Messungen in der zweiten Hälfte der Untersuchung deutlich ungenauer ausgeführt wurden als im ersten Teil der Untersuchung. Für den Parameter *Abweichung* ergab sich keine signifikante Zunahme im Verlauf der Untersu-

chung. Hinsichtlich der Richtigkeit der Bewegungen ergab sich durch Wiederholung also keine Veränderung. Deshalb lässt sich postulieren, dass die Zunahme der *Streubreite* durch die zunehmend ungenauer ausgeführten Bewegungen zustande kam. Die Ursache hierfür könnte in der verminderten motorischen Leistungsfähigkeit der Parkinsonpatienten liegen. Dem widerspricht allerdings, dass die Zunahme der Ungenauigkeit nur bei den Messungen ohne Taktvorgabe auftrat. Dies lässt vermuten, dass es die Taktvorgabe den Parkinsonpatienten möglich macht die Genauigkeit der Unterarmbewegungen auf einem stabilen Niveau zu halten, auch wenn diese im Gruppenvergleich signifikant niedriger war als die der Kontrollen. Bei den Messungen ohne Taktvorgabe zeigten die Parkinsonpatienten hingegen einen Ermüdungseffekt dieses Parameters.

Studien, die einen Lerneffekt durch Training motorischer Aufgaben vorweisen konnten, zeigten eine schnellere Initiierung und Ausführung von Zielbewegungen auf (Platz 1998, Behrmann 2000). Die Probanden erhielten hierbei eine direkte Rückmeldung hinsichtlich der Genauigkeit der ausgeführten Bewegungen. Es lässt sich deshalb vermuten, dass eine Verbesserung der motorischen Fähigkeiten, im Sinne eines Trainings, an eine Rückmeldung über die motorische Aufgabe geknüpft ist. Des Weiteren wurde in der hier vorliegenden Arbeit ein Lerneffekt nicht mit der Abnahme der Bewegungszeit, sondern mit einer erhöhten Exaktheit und einer schnelleren Anpassung an vorgegebene Frequenzen gleichgesetzt. Agostino (1996) fand zwar eine Abnahme der Bewegungszeit mit den Wiederholungen der Bewegung bei Parkinsonpatienten und Kontrollpersonen, gleichzeitig nahm die Zahl der fehlerhaften Bewegungen mit den Wiederholungen in beiden Gruppen zu. In der vorliegenden Arbeit konnte eine Zunahme der fehlerhaften Bewegungen nur in der Gruppe der Parkinsonpatienten bei den Messungen ohne Taktvorgabe bestätigt werden.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass ein Lerneffekt bezüglich der Genauigkeit und der Adaptation der repetitiven Unterarmbewegungen für alle Untersuchungsteilnehmer ausgeschlossen werden kann. Des Weiteren ist ein Lerneffekt bei Rhythmusadaptation für gesunde Kontrollpersonen zumindest fraglich und für Parkinsonpatienten nicht nachzuweisen. Parkinsonpatienten scheinen jedoch im Gegensatz zu Kontrollpersonen auf eine Taktvorgabe angewiesen zu sein, um ihre Unterarmbewegungen bezüglich der Regelmäßigkeit auf einem stabilen Niveau halten zu können.

7 Schlussfolgerung

In dieser Studie konnte bestätigt werden, dass Parkinsonpatienten einen frei wählbaren, angenehmen Takt signifikant langsamer schlagen als gesunde Kontrollpersonen. Bei der Reproduktion dieses frei gewählten Taktes zeigte sich, dass alle Untersuchungsteilnehmer von der Geschwindigkeit der vorher ausgeführten Unterarmbewegungen beeinflusst wurden. Die Frequenz des mittleren Taktes war nach schneller Taktvorgabe signifikant höher als nach langsamer Taktvorgabe. Weder Parkinsonpatienten noch gesunde Kontrollpersonen scheinen also einen so starken internen Taktgeber zu besitzen, als dass dieser nicht von außen beeinflusst werden könnte. Sie scheinen sich vielmehr beim Darbieten der mittleren Frequenz an der vorher dargebotenen Frequenz durch das Metronom zu orientieren.

Die Taktvorgabe durch das Metronom ermöglichte den Versuchsteilnehmern ihre Unterarmbewegungen genauer und regelmäßiger durchzuführen, als dies bei den Messungen ohne Taktvorgabe der Fall war. Parkinsonpatienten wiesen allerdings bei allen Messungen einen höheren zufälligen und systematischen Fehler auf als gesunde Kontrollpersonen. Alle Untersuchungsteilnehmer benötigten für die Anpassung an die langsame Taktvorgabe signifikant mehr Unterarmbewegungen als für die schnelle Taktvorgabe. Die Parkinsonpatienten hatten weiterhin Schwierigkeiten sich an einen vorgegebenen Takt anzupassen, was sich an den signifikant verlängerten Adaptationsphasen im Vergleich zu gesunden Kontrollpersonen zeigte. Aufgrund dieser Ergebnisse ist anzunehmen, dass sie Schwierigkeiten haben, ein motorisches Programm, nämlich die Umstellung auf eine neue Bewegung, in adäquater Zeit umzusetzen.

Die vorliegenden Ergebnisse lassen den Schluss zu, dass Parkinsonpatienten ein komplexes Rhythmusproblem haben. Zum einen hatten sie Schwierigkeiten an einen vorgegebenen Takt anzupassen, was sich an verlängerten Adaptationsphasen zeigte. Zum anderen wiesen sie ein Defizit der internen Rhythmusbildung auf, denn sie konnten einen eigenständigen Takt nur signifikant ungenauer und unregelmäßiger ausführen als die Kontrollpersonen.

Weiterhin wiesen die Parkinsonpatienten Schwierigkeiten beim Ausführen der Bewegungen zur schnellen Taktvorgabe auf. Sie schlugen hierbei den Takt im Mittel um 5,2 % zu langsam. Es ist anzunehmen, dass sich hierbei die Schwierigkeiten der Bewegungsausführung durch die Bradydiadochokinese und der Ungenauigkeit und Unregelmäßigkeit der Bewegungen summierten.

Die Adaptationsphase scheint vom Lebensalter der Probanden beeinflusst zu werden. Die Probanden der altersgematchten Kontrollgruppe benötigten zur Adaptation mehr Unterarmbewegungen als die Probanden der jungen Kontrollgruppe und weniger Unterarmbewegungen als die Probanden der Parkinsongruppe. Auch wenn der Unterschied zu keiner der beiden Gruppen signifikant war, lässt dies eine Abnahme der Fähigkeit der Rhythmusadaptation mit dem Lebensalter vermuten.

Ein Lerneffekt hinsichtlich der Geschwindigkeit der Adaptation konnte in der vorliegenden Arbeit nur für langsame Frequenzen innerhalb der altersgematchten Kontrollgruppe aufgezeigt werden. Da die junge Kontrollgruppe keine schnellere Adaptation durch Training aufwies, kann dieser Lerneffekt in Zusammenschau der Ergebnisse vernachlässigt werden. Keine der Probandengruppen zeigte einen Lerneffekt bezüglich der Genauigkeit und Regelmäßigkeit der Unterarmbewegungen. Dahingegen nahm die Genauigkeit, mit der die Unterarmbewegungen während der Messungen ohne Taktvorgabe ausgeführt wurden, in der Parkinsongruppe im Verlauf der Messungen ab. Es kann also von einem Ermüdungseffekt bei der Reproduktion der mittleren, freigewählten Frequenz ausgegangen werden, welcher sich nur in der Parkinsongruppe nachweisen lässt. Parkinsonpatienten scheinen also, im Gegensatz zu Kontrollpersonen, auf eine externe Taktgebung angewiesen zu sein, um die Regelmäßigkeit ihrer Bewegungen auf einem stabilen Niveau zu halten.

Insgesamt ist davon auszugehen, dass Parkinsonpatienten ein Defizit in der Verarbeitung motorischer Programme besitzen. Es wird postuliert dass dieses Defizit durch den Dopaminmangel in der Substantia nigra verursacht wird, welcher wiederum zu einer verminderten Aktivität des supplementär motorischen Kortex führt. Es sollte also untersucht werden in wie weit eine medikamentöse Therapie des Morbus Parkinson die Defizite in der Ausführung der repetitiven Bewegungen beeinflusst. Des Weiteren wäre zu Prüfen ob die Fähigkeit in der Durchführung repetitiver Bewegungen eine Abhängigkeit vom Krankheitsstadium aufweist.

8 Literatur

1. Agostino R., Berardelli A., Formica A., Accornero N., Manfredi M.
Sequential arm movements in patients with Parkinson's disease, Huntington's disease and dystonia
Brain 1992; 115: 1481-1495
2. Agostino R., Berardelli A., Formica A., Stocchi F., Accornero N., Manfredi M.
Analysis of repetitive and nonrepetitive sequential arm movements in patients with Parkinson's disease
Movement Disorders 1994; 9: 311-314
3. Agostino R., Sanes J.N., Hallett M.
Motor skill learning in Parkinson's disease
Journal of Neurological Sciences 1996; 139: 218-226
4. Agostino R., Berardelli A., Curra A., Accornero N., Manfredi M.
Clinical impairment of sequential finger movements in Parkinson's disease
Movement Disorders 1998; 13: 418-421
5. Almeida Q.J., Wishart L.R., Lee T.D.
Bimanual coordination deficits with Parkinson's disease: the influence of movement speed and external cueing
Movement Disorders 2002; 17: 30-37
6. Almeida Q.J., Wishart L.R., Lee T.D.
Disruptive influences of a cued voluntary shift on coordinated movement in Parkinson's disease
Neuropsychologia 2003; 41: 442-452
7. Becker G.
Methoden zur Frühdiagnose des Morbus Parkinson
Nervenarzt 2003; 74: 7-11

8. Behrman A.L., Cauraugh J.H., Light K.E.
Practice as an intervention to improve speeded motor performance and motor learning in Parkinson's disease
Journal of Neurological Sciences 2000; 174: 127-136
9. Benecke R., Rothwell J.C., Dick J.P., Day B.L., Marsden C.D.
Performance of simultaneous movements in patients with Parkinson's disease
Brain 1986; 109: 739-757
10. Benecke R., Rothwell J.C., Dick J.P., Day B.L., Marsden C.D.
Disturbances of sequential movements in patients with Parkinson's disease
Brain 1987; 110: 361-379
11. Benecke R.
Mutisystemdegenerative Erkrankungen mit Parkinson-Syndrom
Nervenarzt 1999; 70: 35-41
12. Berardelli A., Accornero N., Argenta M., Meco G., Manfredi M.
Fast complex arm movements in Parkinson's disease
Journal of Neurology, Neurosurgery, and Psychiatry 1986; 49: 1146-1149
13. Berardelli A., Hallett M., Rothwell J.C., Agostino R., Manfredi M., Thompson P.D., Marsden C.D.
Single-joint rapid arm movements in normal subjects and in patients with motor disorders
Brain 1996; 119: 661-674
14. Berardelli A., Rothwell J.C., Thompson P.D., Hallett M.
Pathophysiology of bradykinesia in Parkinson's disease
Brain 2001; 124: 2131-2146
15. Bergmann H., Deuschl G.
Pathophysiology of Parkinson's disease: from clinical neurology to basic neuroscience and back
Movement Disorders 2002; 17: 28-40

16. Bernheimer H., Birkmayer W., Hornykiewicz O., Jellinger K., Seitelberger F.
Brain dopamine and the syndroms of Parkinson and Huntington. Clinical, morphological
and neurochemical correlations.
Journal of Neurological Sciences 1973; 20: 415-455

17. Bloxham C.A., Dick D.J., Moore M.
Reaction times and attention in Parkinson's disease
Journal of Neurology, Neurosurgery, and Psychiatry 1987; 50: 1178-1183

18. Brown R.G., Jahanshahi M., Marsden C.D.
The execution of bimanual movements in patients with Parkinson's, Huntington's and
cerebellar disease
Journal of Neurology, Neurosurgery, and Psychiatry 1993; 56: 295-297

19. Byblow W.D., Summers J.J., Lewis G.N., Thomas J.
Bimanual coordination in Parkinson's disease: deficits in movement frequency, ampli-
tude, and pattern switching
Movement Disorders 2002; 17: 20-29

20. Camicioli R.
Identification of parkinsonism and Parkinson's disease
Drugs Today 2002; 38: 677-686

21. Freeman J.S., Cody F.W., Schady W.
The influence of external timing cues upon the rhythm of voluntary movements in Park-
inson's disease
Journal of Neurology, Neurosurgery, and Psychiatry 1993, 56:1078-1084

22. Gordon A.M.
Task-dependent deficits during object release in Parkinson's disease
Experimental Neurology 1998, 153: 287-298

-
23. Haarington D.L., Haaland K.Y., Yeo R.A., Marder E.
Procedural memory in Parkinson's disease: impaired motor but not visuoperceptual learning
Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology 1990; 12: 323-339
24. Hoehn M.M., Yahr M.D.
Parkinsonism: onset, progression, and mortality
Neurology 1998, 50: 318-334
25. Hallett M.
Parkinson revisited: pathophysiology of motor signs
Parkinson's Disease: Advances in Neurology 2003, 91: 19-28
26. Jahanshahi M., Brown R.G., Marsden C.D.
Simple and choice reaction time and the use of advance information for the motor preparation in Parkinson's disease
Brain 1992, 115: 539-564
27. Kauranen K., Vanharanta H.
Influences of aging, gender, and handedness on motor performance of upper and lower extremities
Perceptual and Motor Skills 1996; 82: 515-525
28. Klinke R., Silbernagl S. (Hrsg.)
Lehrbuch der Physiologie, Georg Thieme Verlag: Stuttgart, New York 1996, 2. Auflage
29. Konczak J., Ackermann H., Hertrich I., Spieker S., Dichgans J.
Control of repetitive lip and finger movements in Parkinson's disease: influence of external timing signals and simultaneous execution on motor performance
Movement Disorders 1997, 12: 665-676
30. Krebs H.I., Hogan N., Hening W., Adamovich S.V., Poizner H.
Procedural motor learning in Parkinson's disease
Experimental Brain Research 2001; 141: 425-437

31. Kutukcu Y., Marks W.J., Goodin D.S., Aminoff M.J.
Simple and choice reaction time in Parkinson's disease
Brain Research 1999; 815: 367-372
32. Logigian E., Hefter H., Reiners K., Freund H.J.
Does tremor pace repetitive voluntary motor behaviour in Parkinson's disease?
Annual Neurology 1991; 30: 172-179
33. Marsden C.D., Obeso J.A.
The functions of the basal ganglia and the paradox of stereotaxic surgery in Parkinson's disease
Brain 1994; 117: 877-897
34. Masuhr K.F., Neumann M.
Neurologie, Hippokrates-Verlag: Stuttgart; 1992, 2. Auflage
35. McIntosh G.C., Brown S.H., Rice R.R., Thaut M. H.
Rhythmic auditory-motor facilitation of gait patterns in patients with Parkinson's disease
Journal of Neurology, Neurosurgery, and Psychiatry 1997; 62: 22-26
36. Nagasaki H., Nakamura R., Taniguchi R.
Disturbances in rhythm formation in patients with Parkinson's disease: part II.
A forced oscillation model
Perceptual and Motor Skills 1978; 46:79-87
37. Nagasaki H., Itoh H., Maruyama H., Hashizume K.
Characteristic difficulty in rhythmic movement with aging and its relation to Parkinson's disease
Experimental Aging Research 1988; 14: 171-176
38. Nakamura R., Nagasaki H., Narabajashi H.
Disturbances of rhythm formation in patients with Parkinson's disease: Part I.
Characteristics of tapping response to the periodic signals
Perceptual and Motor Skills 1978; 46: 63-75

-
39. Nakashima K., Shimoyama R., Takahashi K.
Paired choice reaction tasks in patients with Parkinson's disease
Acta Neurologica Scandinavica 1993; 87: 178-183
40. Nieuwboer A., De Weerd W., Dom R., Lesaffre E.
A frequency and correlation analysis of motor deficits in Parkinson patients
Disability and Rehabilitation 1998; 20: 142-150
41. Nutt J.G., Lea E.S., Van Houten L., Schuff R.A., Sexton G. J.
Determinants of tapping speed in normal control subjects and subjects with Parkinson's disease: differing effects of brief and continued practice
Movement Disorders 2000; 15: 843-849
42. Pastor M.A., Jahanshahi M., Artieda J., Obeso J.A.
Performance of repetitive wrist movements in Parkinson's disease
Brain 1992; 115: 875-891
43. Platz T., Brown R.G., Marsden C.D.
Training improves the speed of aimed movements in Parkinson's disease
Brain 1998; 121: 505-514
44. Poeck K., Hacke W.
Neurologie, Springer-Verlag: Berlin, Heidelberg, New York, 2001, 11.Auflage
45. Rand M.K., Stelmach G.E., Bloedel J.R.
Movement accuracy constraints in Parkinson's disease patients
Neuropsychologia 2000; 38: 203-212
46. Rand M.K., Van Gemmert A.W., Stelmach G.E.
Segment difficulty in two-stroke movements in patients with Parkinson's disease
Experimental Brain Research 2002; 143: 383-393

-
47. Sanes J.N.
Information processing deficits in Parkinson's disease during movements
Neuropsychologia 1985; 23: 381-392
48. Sheridan M.R., Flowers K.A., Hurrell J.
Programming and execution of movement in Parkinson's disease
Brain 1987; 110: 1247-1271
49. Sheridan M.R., Flowers K.A.
Movement variability and bradykinesia in Parkinson's disease
Brain 1990; 113: 1149-1161
50. Silbernagl S., Lang F.
Taschenatlas der Pathophysiologie, Georg Thieme Verlag: Stuttgart, New York 1998
51. Swinnen S.P., Steyvers M., Van Den Bergh L., Stelmach G.E.
Motor learning and Parkinson's disease: refinement of within-limb and between-limb coordination as a result of practice
Behavioural Brain Research 2000; 111: 45-59
52. van den Berg C., Berg P.J., Wagenaar R.C., van Wieringen P.C.
Coordination disorders in patients with Parkinson's disease: a study of paced rhythmic forearm movements
Experimental Brain Research 2000; 134: 174-186
53. van Hiten J.J., van Eerdt A.A., Wagemans E.A.H., Middelkoop H.A.M., Roos R.A.C.
Bradykinesia and hypokinesia in Parkinson's disease: what's in a name?
Journal of Neural Transmission 1998; 105: 229-237
54. Wichmann T., DeLong M.R.
Functional neuroanatomy of the basal ganglia in Parkinson's disease
Parkinson's Disease: Advances in Neurology 2003, 91: 9-18

55. Yahalom G., Simon E.S., Thorne R., Peretz C., Giladi N.
Hand rhythmic tapping and timing in Parkinson's disease
Parkinsonism & Related Disorders 2004; 10: 143-148

9 Dank

Ich möchte zunächst Herrn PD Dr. U. Dillmann für die Überlassung des Themas, die Unterstützung meiner Arbeit und die sorgfältige Durchsicht der Arbeit danken.

Zu großem Dank bin ich auch Herrn Dr. J. Spiegel für die gute Betreuung meiner Arbeit verpflichtet. Er hat die Arbeit von Anfang mit großem persönlichem Engagement begleitet und war jederzeit für Fragen und bei Problemen ansprechbar.

Schließlich möchte ich ganz besonders meinen Eltern danken, die mir durch ihre Hilfe Studium und Promotion ermöglicht haben. Ohne ihre moralische und finanzielle Unterstützung hätte ich die Möglichkeit einer akademischen Laufbahn vielleicht nicht gehabt.

10 Lebenslauf

Lena Arnold

geboren am 08.11.1980

in Filderstadt

Schule

<i>1987 – 1990</i>	Grundschule in Freiberg a.N.
<i>1990 – 1999</i>	Oscar-Paret-Schule in Freiberg a.N. Abschluss: allgemeine Hochschulreife

Studium

<i>10 / 1999 – 05 / 2006</i>	Studium der Humanmedizin an der Universität des Saarlandes, Homburg
<i>09 / 2001</i>	Ärztliche Vorprüfung, Gesamtnote: gut
<i>08 / 2002</i>	Erster Abschnitt der ärztlichen Prüfung, Note: gut
<i>03 / 2005</i>	Zweiter Abschnitt der ärztlichen Prüfung, Gesamtnote: gut
<i>05 / 2006</i>	Dritter Abschnitt der ärztlichen Prüfung, Note: sehr gut

Famulaturen

<i>09 - 10 / 2002</i>	Internistische Gemeinschaftspraxis Dr. Merz, Dr. Künzlen, Dr. Busch, Bietigheim-Bissingen
<i>02 - 03 / 2003</i>	Klinik für Dermatologie und Venerologie, Universitätsklinikum Homburg
<i>09 - 10 / 2003</i>	Pädiatrie und Chirurgie, Kalubowila Colombo South Teaching Hospital, Colombo, Sri Lanka
<i>03 - 04 / 2004</i>	Klinik für Psychiatrie und Psychotherapie, Universitätsklinikum Homburg

Praktisches Jahr

- | | |
|------------------------------|---|
| <i>04 – 08 / 2005</i> | 1. Terial: Innere Medizin, Universitätsklinikum Homburg
Klinik für Pulmologie und Allergologie, Klinik für
Gastroenterologie, Hepatologie, Endokrinologie |
| <i>08 – 12 / 2005</i> | 2. Terial: Klinik für Psychiatrie und Psychotherapie,
Universitätsklinikum Homburg |
| <i>12 / 2005 – 03 / 2006</i> | 3. Terial: Chirurgie, Universitätsklinikum Homburg
Klinik für Unfallchirurgie, Klinik für Herz-Thorax-Chirurgie,
chirurgische Intensivstation |

Beruf

- | | |
|-----------------------|--|
| <i>Seit 06 / 2006</i> | Assistenzärztin in den Inneren Medizin II, Krankenhaus
Bietigheim-Bissingen |
|-----------------------|--|

11 Anhang

Tabelle 11.1: univariate Varianzanalyse für *halbe Periodendauer [ms]*

	Signifikanz
GRUPPE	,01239

Tabelle 11.2: univariate Varianzanalyse für *Adaptationszeit [ms]*

	Signifikanz
GRUPPE	,00000
SPRUNG	,00000
GRUPPE * SPRUNG	,00012

Tabelle 11.3: univariate Varianzanalyse für *Adaptationszeit [ms]* getrennt nach Sprüngen

Sprung		Signifikanz
Eigen nach langsam	GRUPPE	,01183
Langsam	GRUPPE	,00000
Eigen nach schnell	GRUPPE	,07792
Schnell	GRUPPE	,00029

Tabelle 11.4: univariate Varianzanalyse für *Adaptation nach Anzahl der Unterarmbewegungen*

	Signifikanz
GRUPPE	,00012
SPRUNG	,00000
GRUPPE * SPRUNG	,04940

Tabelle 11.5: univariate Varianzanalyse für *Adaptation nach Anzahl der Unterarmbewegungen* getrennt nach Sprüngen

Sprung		Signifikanz
Eigen nach langsam	GRUPPE	,20399
Langsam	GRUPPE	,01431
Eigen nach schnell	GRUPPE	,05752
Schnell	GRUPPE	,02640

Tabelle 11.6: univariate Varianzanalyse für *Adaptation nach Anzahl der Unterarmbewegungen* getrennt nach Gruppen

GRUPPE		Signifikanz
Parkinson	SPRUNG	,00000
Kontrolle	SPRUNG	,00000
Kontr. jung	SPRUNG	,00000

Tabelle 11.7: univariate Varianzanalyse für *Streubreite [ms]*

	Signifikanz
GRUPPE	,00002
SPRUNG	,00000
GRUPPE * SPRUNG	,92808

Tabelle 11.8: univariate Varianzanalyse für *Abweichung der durchschnittlichen halben Periodendauer [%]*

	Signifikanz
GRUPPE	,45361
SPRUNG	,02472
GRUPPE * SPRUNG	,23877

Tabelle 11.9: univariate Varianzanalyse für *Standardabweichung der halben Periodendauer [%]*

	Signifikanz
GRUPPE	,00002
SPRUNG	,09259
GRUPPE * SPRUNG	,38425

Tabelle 11.10: univariate Varianzanalyse für *Werte im Zielbereich [%]*

	Signifikanz
GRUPPE	,00000
SPRUNG	,00000
GRUPPE * SPRUNG	,80710

Tabelle 11.11: univariate Varianzanalyse für *Amplitudenabweichung bei Beugebewegung [°]*

	Signifikanz
GRUPPE	,39326
SPRUNG	,35816
GRUPPE * SPRUNG	,99693

Tabelle 11.12: univariate Varianzanalyse für *Amplitudenabweichung bei Streckbewegung [°]*

	Signifikanz
GRUPPE	,00000
SPRUNG	,51160
GRUPPE * SPRUNG	,95138

Tabelle 11.13: Abweichungen der Probanden der Parkinsongruppe

Initialen	langsame Taktvorgabe	Eigenfrequenzen	schnelle Taktvorgabe
M.F.	-5,80%	-15,93%	-13,25%
K.F.	5,06%	12,27%	-0,31%
M.K.	0,86%	3,96%	-16,91%
H.M.	-2,21%	9,97%	0,43%
H.S.	-0,43%	-10,56%	-6,77%
M.M.	-1,71%	10,22%	0,48%
M.N.	1,10%	17,10%	0,96%
R.N.	-1,48%	11,21%	1,16%
G.S.	-1,00%	-5,93%	-7,87%
A.L.	6,44%	-11,74%	-1,34%
A.D.	-7,27%	-31,33%	-19,24%
G.S.	5,82%	23,82%	-6,64%
M.K.	3,53%	12,47%	0,32%
J.K.	-2,12%	-1,49%	1,93%
H.K.	-8,45%	-13,54%	-31,39%
H.H.	0,21%	12,89%	-0,55%
M.B.	9,99%	6,66%	6,11%

Tabelle 11.14: Abweichungen der Probanden der altersgematchten Kontrollgruppe

Initialen	langsame Taktvorgabe	Eigenfrequenzen	schnelle Taktvorgabe
N.H.-K.	-0,81%	-55,63%	0,68%
E.T.	0,25%	11,65%	0,64%
M.U.	1,80%	8,20%	-0,31%
J.A.	3,83%	-6,69%	6,77%
U.A.-K.	0,23%	5,71%	-0,39%
G.H.	-0,67%	13,04%	0,52%
H.H.	1,21%	-4,00%	0,30%
G.N.	1,78%	17,60%	1,24%
E.M.	-0,71%	5,07%	0,17%
W.Z.	-4,35%	4,06%	-2,83%
A.H.	5,17%	-3,03%	0,13%
A.S.	-0,01%	-10,26%	1,93%
H.H.	-0,96%	-2,66%	0,21%
J.S.	0,17%	-12,54%	0,03%
T.B.	0,48%	6,11%	0,82%
B.E.	1,48%	18,30%	0,42%
S.M.	-1,03%	17,64%	0,95%

Tabelle 11.15: Abweichungen der Probanden der jungen Kontrollgruppe

Initialen	langsame Taktvorgabe	Eigen- frequenzen	schnelle Taktvorgabe
S.H.	-2,09%	1,94%	-1,72%
N.B.	0,64%	-11,22%	0,64%
T.G.	0,65%	-7,56%	-0,58%
I.E.	-0,02%	-4,73%	0,77%
M.B.	-0,28%	2,46%	0,52%
T.B.	7,07%	-11,86%	0,62%
J.A.	-0,51%	-10,50%	5,19%
A.W.	0,19%	3,08%	1,04%
V.H.	0,38%	10,23%	0,20%
B.M.	0,90%	-2,38%	0,98%
S.B.	1,52%	-13,10%	1,85%
F.S.	1,42%	4,36%	0,08%
G.S.	1,23%	-10,42%	0,66%
S.S.	-2,08%	-0,82%	1,38%
J.J.	-0,44%	14,32%	0,64%
H.B.	0,32%	-19,74%	0,10%